

福島第一原子力発電所事故における放射線量の計測と分析

Measurement and Analysis of a Dose of Radiation in a Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident

石川 宏 Hiroshi Ishikawa†

Summary

東日本大震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所事故から3年経過したが、記憶は薄れることなく、事故の収束にまだまだ大きな努力を必要としている。筆者は東京都日野市においてそれ以前からガイガーカウンタを設置し放射線量を計測し、リアルタイムにホームページに公開していたところ、事故直後日野市にも放射性物質が飛来し、異常データをキャッチした。多くの方がこのホームページを御覧になり、思わぬ反響があった。そのシステムの概要、計測結果を報告し、あわせて災害時における情報公開の在り方について考察する。またその後も計測を続け、長期間の変化をフーリエフィルタで抽出すると、かなり詳細な変化を読み取れることが分かった。更に非線形最小二乗法で分析することにより、従来ガイガーカウンタで不可能とされていた放射性物質（核種）ごとの放射線量を推定することができることを示す。

Key Words

気象観測、放射線量計測、東京電力福島第一原子力発電所事故、情報公開

1

ナチュラル研究所の気象観測

10年前に東京都日野市に「太陽熱利用住宅」という、太陽の熱を変換せずに熱のまま家の中に取り込む方式の家^{*1}を建設した。屋根が二重構造になっており、その隙間を空気が通る間に、太陽熱を吸収し暖められ、暖房や給湯に利用する方式である。住んでみると大変快適、省エネルギーで、思いどおりの家になったが、家の外と内の温度はどうか、一体どのくらいのエネルギーが天から降り注いでいるのか、ということの数値で評価したくなり、気象センサを作り、自動計測を行うこととした。当初、温湿度計、室内温湿度計のみであったが、徐々に充実し、2004年には風速風向計、日照計、雨量計、気圧計、雷センサなど気象観測に必要なひとつの観測機器をそろえた。その代表的なものを図1に示す。なお、家のエネルギー評価結果については別稿に譲る⁽¹⁾。

観測機器は全て自作で、コンピュータとの接続インタフェースは1-WireLAN方式である。1-WireLANは、ダラス・セミコンダクタ社^{*2}が開発した1ワイヤバスシステムで、MicroLANとも呼ばれる⁽²⁾。1-Wireとはいっても、正確にはアース線も含めて2本の銅線（電話用のペア線など）を用い、数十mの範囲に散在する数百個のセンサや制御機器を、いもづる方式あるいは



図1 気象観測機器

スター方式で接続する。各センサの情報をパソコンに収集したり、簡単な制御を行うことができ、簡単にセンサネットワークを構成できる。またパラサイト方式により同一の線上で5Vの電源も供給でき、電池不要で長期間の計測が可能である。A-D変換、カウンタなど主要部品はインタフェース回路とともにLSI化され、チップ一つ一つに固有IDが書き込まれており、ソフトから識別できる。米国では1-Wireの気象観測機器の組

† ナチュラル研究所、東京都
Natural Research Laboratory, Tokyo, 191-0041 Japan

*1 奥村昭雄が提唱したOMソーラーハウス、<http://omsolar.jp>

*2 ダラス・セミコンダクタ社はその後2001年にマキシム・インテグレーテッド社に吸収された。

立キットがネット販売され、また簡単に回路を自分でも作り上げることができる。ログを取り、計測結果グラフを表示するソフトは、シェアウェアで入手可能である*³。

計測結果は、ローカルに表示するのみならず、「ナチュラル研究所」ホームページにリアルタイムで公開している*⁴。また、日ごと、あるいは月に一度動く統計ソフトを自作し、過去データの比較など気象統計を表示している。詳しい観測機器の作り方もそのホームページにある。

2 原子力発電所の事故に伴う異常検出

気象観測の一環として、2005年11月からガイガーカウンタ(図2)により放射線量を計測していた。きっかけは隣国の核実験であった。ガイガーカウンタは、適当な部品が入手困難であったため自作は諦め、市販

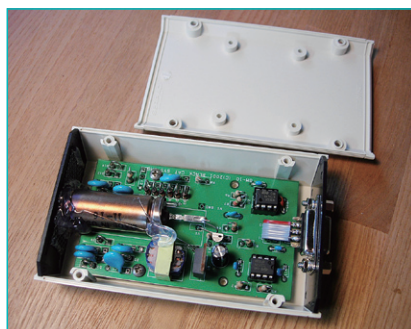


図2 使用したガイガーカウンタ

Black Cat Systems 社製 \$199.
内蔵ガイガーチューブの大きさ: 直径 15 mm,
120 カウント / 秒 = 1 $\mu\text{Sv/h}$ により放射線量を換算。

品である。コンピュータとはシリアル接続で自動計測し、1分ごとのログ記録と5分ごとのグラフ表示を行い、ホームページにアップしていた。

2011年3月11日、東日本大震災に伴い東京電力福島第一原子力発電所の事故があり、数日後異常データを検出した。図3は、ホームページにアップした2011年3月15日の放射線量の計測結果のグラフで、それまで自然放射線量(バックグラウンド)のみで安定していた値が、昼前から急に立ち上がり、異常値を示したものである。ピークは15日12時21分、0.75 $\mu\text{Sv/h}$ であった。

後から分かったことであるが、12日頃から福島第一原子力発電所は危機的な状況になり、水素爆発があった、あるいは建屋が飛んだ、など様々なことが起きていた^{(3)~(5)}。特に2号機は15日未明、格納容器が破壊され、それにより相当の量の放射性物質が大気中に飛散したとのことである⁽⁴⁾。福島第一原子力発電所は日野市から北東約240 kmにあり、当時北東の風が5 m/s吹いていたので、この値が全区間で続くとなると12時間で飛来することになる。その後国立環境研究所から、放出量、風向風速の地理的・時間的分布を考慮した詳細な飛散シミュレーション結果が公表されたが⁽⁶⁾、当地点に放射性物質が到達した時刻が一致しており、この異常値は2号機事故に伴う放射性物質が飛来したものによると考えられる。

3 情報公開に対する反響

この瞬間をリアルタイムに計測して、インターネット

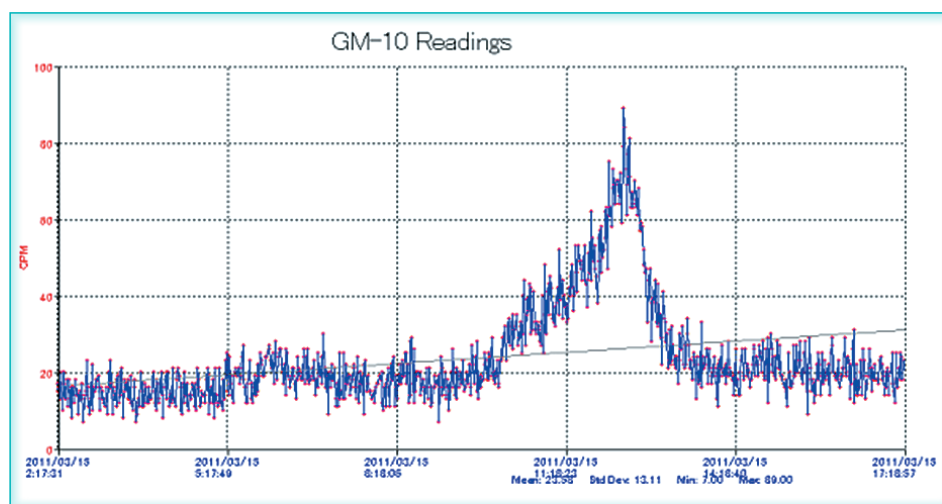


図3 2011年3月15日17時19分の放射線量の計測結果

縦軸一目盛り20 CPM, 横軸一目盛り3時間。

* 3 WeatherDisplayなど, <http://www.weather-display.com>

* 4 <http://www.ishikawa-lab.com>

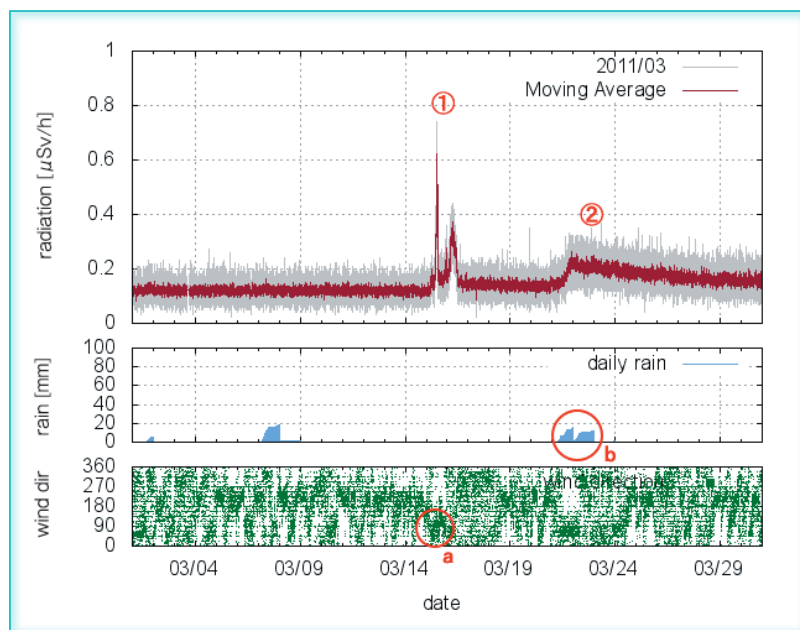


図4 2011年3月、1か月分の放射線量と気象データ

①の初めて飛来した3月15日の変化と、②の降雨による21日の変化とはメカニズムが異なり、特に②が問題である。放射線量はすぐには低下せず、この後地表に長くとどまり影響を残した。

トで見ることができたサイトは、ほとんどなかったらしい。2ちゃんねるやFacebookなど口コミで紹介され、瞬く間に広がり、アクセスが集中した。3月11日の地震発生以前は、当ホームページへの1日当たりのアクセスは10回程度であったものが、3月15日に一気に増え、20万件を超えた*⁵。これは、見えない放射能の恐ろしさに対し、ほかに適切な情報がなかったために、筆者のサイトに頼ったのではないと思われる。

一時、極度のトラヒック集中が発生し、利用者からアクセスできないのみならず、更新不可能な状況になった。その中でボランティアの皆さんが自主的に数か所のミラーサイトを作って下さり、負荷分散がなされた。その中には、携帯から見られるサイトもあった。また、所属のプロバイダは、サーバの独立、回線の上下分離などを適切にやって頂いた。そのため、トラヒック集中は続いたが、アクセス可能となり、見えないという苦情はなくなった。ホームページのランキングサイトwebDICEによると、当サイトは2011年3月のアクセスランキング全国1位、同じく2011年年間2位とのことであった*⁶。

また、各報道機関、外国メディア、地元紙などたくさんの取材の申込みがあり、外国メディア(BBC)い

わく「3月16日時点で、日本で放射線量を公開しているのはあなたのところしかない」とのことであった。

筆者の方に寄せられたメールやFacebookの内容を少し紹介させて頂く。「ナチュラル研究所で数値をリアルタイムに確認できるおかげで、放射能を必要以上におそれず、外を歩けるようになりました」、「国の情報を得られない中で、数値で被災前と比較確認できるというのがすごいです」、「政府や東京電力の数値はあてにならないので、こちらだけが頼りです」、「市民は馬鹿ではありません。冷静ですから、こういうデータが公表されてもパニックには陥らない。逆に公表されない方が非常に不安をかきたてられます」、「どうして大学、国研、自治体など、税金で運営される組織が、このような見やすい科学的連続グラフを出せないのでしょうか」などというメッセージを頂戴した。日野市内の方はもちろん、都内、近県、韓国、ロシア、オーストラリア、ヨーロッパからの投稿もあった。情報公開の重要性を考えさせられた。

4 気象データとの突き合わせ

当研究所は、気象データも計測しているので、図4のように2011年3月、1か月分の放射線量と気象データを合わせて表示する。放射線量は $\mu\text{Sv/h}$ に換算し、グレーの観測生データのほか、えんじ色で10分間の移動平均値も示す。雨量は1日の降雨量(mm)で、深夜0時にリセットされる。風は、北から時計回りの角

*5 ナチュラル研究所のトップページへのアクセス(実測値6万件)のほか、その写し(ミラーサイト)へのアクセスを含む推計値。このほかにアクセス集中でアクセス不可となったものはカウントできていない。

*6 ランキングの対象サイト、測定方法などは詳細不明。
<http://www.webdice.jp/dice/detail/2996/>

度で風向を示している。(90度が東, 180度が南を表し, 1分ごとの計測を一つのドットで表示.)

図4の①は2章に述べたとおりである。図4のaのように, 15日の午前中はたまたま福島方向からの北東の風が吹いていた。当地は, 南の風あるいは南西の風の頻度が高いが, 気象条件により, このような北東風が吹くときがある。

幾つかの山の後, 16日の午後になると放射線量は, ほとんど元のバックグラウンド値に近い値に戻っているため, 放射性物質は, 地上に沈着することはなかったと理解している。

その後数日経過し, 図4の②のように, 3月22日0時頃に, 再び最大 $0.3\mu\text{Sv/h}$ に上昇した。これは図4のbのように3月21~22日にかけて27mmのまとまった降雨があり, 空気中にあった放射性物質が雨滴とともに落下し, 地面に付着したためと考えた。事故後初めての降雨であり, 風のデータはこのときも北東を示していた。

22日の異常値は各所で観測されており⁽⁷⁾, 15日飛来の放射性物質が空気中に残留していてそれが落下しただけでは説明がつかない大きな値であるので, この時点で新たに放射性物質が放出され, それが飛来したとも推測できる。「3号機で3月21日16時頃に黒い煙があがったが, それは再溶融が発生したためと判明した」⁽⁸⁾との報道もあり, いまだに新たな放出については謎である。(各事故調査委員会最終報告書にはこの再溶融の記述はない。)本件は千葉県, 茨城県など各地で見付かったホットスポット⁽⁹⁾の形成過程を分析する上で重要であり, 解明が望まれる。

5 フーリエフィルタによる信号処理

時間軸を長く取って, 放射線量の変化を見てみよう。図5には3月22日以降の約1年分の観測データを示す。これは前記, 図4②の3月22日0時を基点とした変化である。横軸は経過日数で, グレーは計測値, えんじ色は10分間の移動平均値である。ガイガーカウンタの数値はポアソン分布に従うが, 観測値は大きくばらつき, 10分間の平均値では全体として減少傾向であることは分かるが, その間の詳細な変化を読み取ることは困難である。

このためにデジタル信号処理により雑音を除去し, 変化だけを抽出することとする。具体的には, 計測時系列生データをフーリエ変換し, 周波数軸上のスペクトルに変換する。そして周期の短い, 高い周波数の変動を雑音とみなし削除する。ここでは360分(6時間)以下の変化を削除している。そしてそれをフーリエ逆

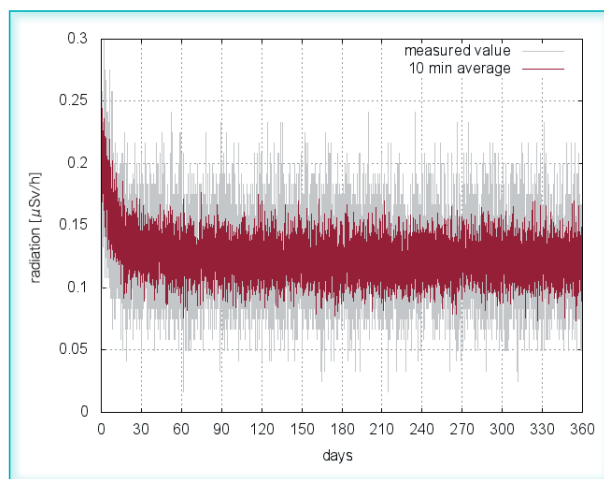


図5 3月22日以降の約1年分の観測データ。

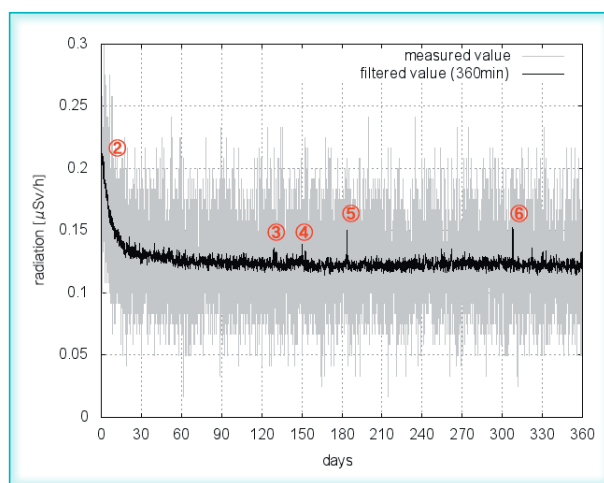


図6 ノイズを除去した観測データ。

②は図3の②と同じ時点, ③, ④, ⑤, ⑥は本文参照。

変換し, 再び時間変化をグラフ表示する。

その結果を図6の黒線で示す。地面に付着した放射性物質のうち, 半減期の短い放射性元素からの空間線量が低下していくのが分かる。また単調減少だけではなく, 幾つかの異常値が見える。例えば, 90日目頃(2011年6月下旬)になると現地では循環型の汚染水処理システムが稼働しているが⁽¹⁰⁾, まだ処理システムは不安定で何回か汚染水漏れが発生したとのことである⁽¹¹⁾。図6の③あるいは④はそれと関係があるのではないかと疑われるが, 現場により近い観測点との比較が必要である。また, ⑤の183日目(2011年9月21日)のピーク状の変化時には最大級の台風15号が関東地方を通過している。その後, 何度か関東地方に台風が上陸しているが, そのたびに放射線量の変化を観測している。事故前には暴風雨に際しこのような放射線量の変化はなかったので, 事故によるものと考えられる。更に⑥の, 307日目の変化は2012年1月23日の東京に降った大雪による影響である。一般に降雨時には放射線は増加するが, 降雪時の変化はそれよりも大

きいようで、大気中の放射性物質の吸着の量が雨の場合より大きいからと考えられるが、これは今後の研究課題である。

長期間計測しデジタル信号処理により雑音を除去すると、微妙な変化を捉えることができることが分かる。

6 放射性物質の分析

事故に伴い様々な種類（核種）の放射性物質が飛散した。ガイガーカウンタは、核種を特定することはできないが、長期間の計測値を用い、含まれる核種ごとの放射線量がある程度推定できることを以下に示す。

放出された放射性物質は、よう素 131、セシウム 134、セシウム 137 が大部分であるので^{*7}、観測される放射線量はそれらの合計値であると仮定する。それぞれの半減期は 8 日、2 年、30 年であるから合計の放射線量は、時間（経過日数）の関数として次の式のように記述できる。ここで、0.117 は被災前の当地のバックグラウンド放射線量である。また、セシウム 134 とセシウム 137 の放出量は同一と仮定している^{*8}。

$$f(t) = \alpha \times 2^{-\frac{t}{8}} + \beta \times 2^{-\frac{t}{2 \times 365}} + \beta \times 2^{-\frac{t}{30 \times 365}} + 0.117$$

次にフーリエフィルタの出力 360 日分をこの式に当てはめ、非線形最小二乗法により、 α と β を求める。その結果

$$\alpha = 0.07864, \quad \beta = 0.00288$$

を得る。すなわち、飛来した放射性物質ごとの空間線量は、2011 年 3 月 22 日 0 時の時点で、

$$\text{よう素 131} = 0.0786 \mu\text{Sv/h}$$

$$\text{セシウム 134} = 0.00288 \mu\text{Sv/h}$$

$$\text{セシウム 137} = 0.00288 \mu\text{Sv/h}$$

と分析できる。その比はよう素 131：セシウム 134：セシウム 137 = 25：1：1 と推定される。

本来、核種ごとの放射線量はゲルマニウム検出器により計測し、放射線のエネルギースペクトル分析が用いられる。例えば、産業技術総合研究所つくばセンターの精密計測によれば、その比は 21：1：1.25 と報告さ

*7 東京電力は 2012 年 5 月 24 日に、大気中に放出された放射性物質はよう素 131、セシウム 134、セシウム 137 それぞれ、500 ペタベクレル：10 ペタベクレル：10 ペタベクレルと発表した。http://www.tepco.co.jp/cc/press/2012/1204619_1834.html

*8 一般的にはセシウム 134 とセシウム 137 の放出量は異なるので、もう一つ変数を増やし最小二乗法を適用すべきであるが、収束が悪く、求めることができなかった。*7 のように放出されたセシウム 134 とセシウム 137 の量は同一であるので妥当な仮定と考える。

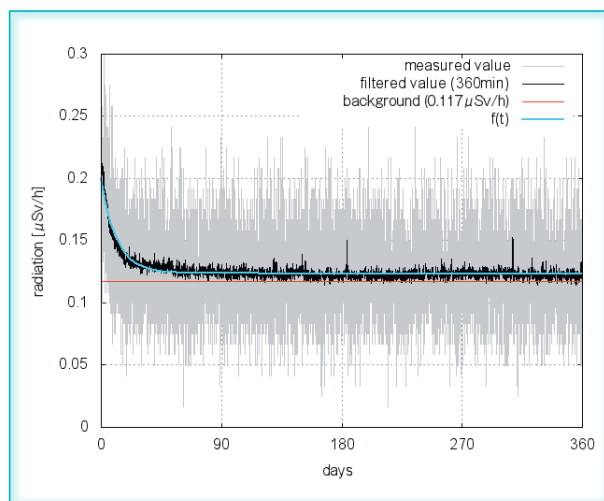


図 7 非線形最小二乗法による推測結果。

れており^{*9}、おおむねよい一致を見ている。

図 7 には求められた式も重ねてグラフにしている（青線）。右端の 1 年を経過しても、バックグラウンド（赤線）に比べるとまだ上にあり、これは放射性セシウムの影響が残っているためである。

更に、例えば本稿が掲載される 2014 年 2 月末で、1,100 日経過するので、上の式に代入すると放射性物質ごとの残留放射線量が計算でき、

$$\text{よう素 131} = 0.00000 \mu\text{Sv/h}$$

$$\text{セシウム 134} = 0.00101 \mu\text{Sv/h}$$

$$\text{セシウム 137} = 0.00268 \mu\text{Sv/h}$$

と求められる。半減期の短いよう素 131 は影響がなくなっているが、セシウム 134 は半減以下、セシウム 137 の放射線量は事故後ほとんど変化していない。

以上の解析手法は、あらかじめ放射性物質の種類が分かっており、初期状態から放射性物質の追加が無視できる場合に適用することができる。

今まで一般住民に対して、今回の事故で放射線の健康影響はほとんどないと説明されてきたが、よう素 131 はチェルノブイリ原発事故後に急増した子供の甲状腺がんとの因果関係が立証されている。よう素 131 の正確な被ばく調査が重要であるが、半減期 8 日と短時間で消滅するため、いかにしてその量を推計するかが課題であるという⁽¹²⁾。ここで用いたデジタル信号処理は、通信分野では雑音の中から信号を取り出す技術としてよく用いられる方法であるが、ガイガーカウンタによる放射線量のような雑音の大きい計測値を処理する場合にも有効と考える。非線形最小二乗法によ

*9 産業技術総合研究所つくばセンターにおける放射線測定結果から、2011 年 3 月 15～22 日のよう素 131：セシウム 134：セシウム 137 の比の平均値を求めたもの。http://www.aist.go.jp/taisaku/ja/measurement/index.html

り核種を分析する方法は、制約は多いが課題解決の手法となり得るとして提案しているところである⁽¹³⁾。

7 災害時の情報公開について

福島原発事故独立検証委員会（いわゆる民間事故調）の最終報告書⁽³⁾に、当研究所の情報公開活動が紹介された。第4章リスクコミュニケーションの中で、「政府あるいは東京電力は人々がもとめる情報発信をしてこなかった。そのなかで都内への放射性物質飛来を観測していたナチュラル研究所のサイトには多数のアクセスがあり有用であった」と図入りで紹介している。当時適切な情報を与えられなかった国民は深刻な不安に悩まされ、最適な避難行動がとれない場合もあった⁽¹⁴⁾。適切な情報を飾らず生のまま、リアルタイムで情報公開するということが肝心である。隠す、小出しは信頼を損ね、かえって不安を増大させる。受け手の国民も、国任せでなく、重要な判断には、自分で工夫して質の高い情報を得る、ということも大切ではないかと考える。

当研究所の放射線量、気象観測結果を、研究用に数値生データとして随時公開しており、幾つかの研究機関でダウンロードをして利用頂いている。新たな成果が得られることを期待している⁽¹⁵⁾。

ごく簡単なガイガーカウンタという計測器でも、長期定点計測し情報処理し、気象データと突き合わせると、かなりの情報が得られる。事故後、全国で公的なモニタリング体制が整いつつあるが、気象データ（特に、風向風速と局地性の強い雨量）の計測を同時に行うことが必須で、気象庁の「地域気象観測システム」AMeDASと統一運用が望まれる。また利害関係のない、第三者の活動も重要である。現在、筆者と同規格のガイガーカウンタを導入した方々によるアマチュア観測網ができており、共通の地図上で観測結果を一覧できる^{*10}。今後、観測データの交換を行い、データ分析を行う計画である。

8 おわりに

子供の頃は工作好きでいろいろな電子工作をやってきたが、仕事は大形のシステム開発プロジェクトに携わることが多く、大勢の人間に関わるが多かった⁽¹⁶⁾。退職後、子供の頃を思い出し一人で構築したものが、今回思いがけず皆様の役に立つこととなってし

まった。

観測機器は作っておしまいではなく、むしろ継続運転が重要で、24時間365日、長期的に安定した動作が必須である。半導体で構成される気象観測のセンサは、太陽の紫外線を浴び、雨にさらされ、あるいは40度近い高温やマイナス10度の低温環境に置かれる。組立の技量（はんだ付けなど）の問題もあり、残念ながら時々故障する。また、1-WireLANは簡便に計測系を作ることができるが、ひとたび故障が発生すると、その切り分けに手間取る。更には、計測用のコンピュータは汎用のWindowsデスクトップで、不定期に更新プログラムが走り、そのたびに計測が中断する。

最近ハード・ソフトとも安定しているので、99.9%程度の稼働率を得ているが、引き続きメンテナンスに力を入れ、継続的に計測を行い、新しい知見を得るよう努力する所存である。

謝辞 今回の観測、情報公開においては、ホームページを御覧になった方々の自発的な行動に助けられた。ミラーサイトを自主的に作って下さった皆さん、極度のトラヒック集中時に適切な対処をして下さったNTT-MEの担当の方、データ整理やホームページの翻訳をお手伝い頂いたボランティアの方々、同規格のガイガーカウンタを導入しアマチュア観測網形成に御協力を頂いた方々、計画停電対策として無停電電源装置を提供して下さいた慶應義塾大学和田賢治教授、フーリエフィルタの有効性を御示唆頂いた元宮崎大学青山智夫准教授、適切なアドバイスを頂いたもったいない学会石井吉徳会長、激励メッセージを下された多くの方々に、この場をお借りして深く感謝の意を表す次第である。

文献

- (1) 石川 宏, “太陽熱利用住宅のEPR評価,” もったいない学会WEB学会誌, vol.3, pp.13-17, Sept. 2009.
- (2) D. Awtrey, “The 1-Wire Weather Station,” SENSORS, vol.15, no.6, June 1998.
- (3) 福島原発事故独立検証委員会, “福島原発事故独立検証委員会調査・検証報告書,” 2012年3月11日.
- (4) 東京電力福島原子力発電所事故調査委員会, “国会事故調 報告書,” 2012年7月5日.
- (5) 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会, “政府事故調 中間・最終報告書,” 2012年7月23日.
- (6) 国立環境研究所, “福島第一原子力発電所から放出された放射性物質の大気輸送沈着シミュレーション,” 2011年8月11日, <http://www.nies.go.jp/shinsai/1-2.html>
- (7) 例えば, 日本分析センター, “日本分析センターにおける空間放射線量率の測定結果,” 2011年3月, http://www.jcac.or.jp/lib/senryo_lib/insitu_2011_3.pdf
- (8) “震災10日後、2度目の溶融か 福島3号機、専門家指摘,” 朝日新聞, 2011年8月8日.

* 10 2013年12月15日現在, 26のサイトが参加している. <http://www.blackcatsystems.com/RadMap/?locale=japan>

- (9) 早川由起夫, “福島第一原発からもれた放射能の広がり,” <http://gunma.zamurai.jp/pub/2012/0305Gmap.jpg>
- (10) “福島第一原発, 循環注水冷却を開始…東電,” 読売新聞, 2011年6月27日.
- (11) “汚染水処理システム, 7時間半停止…装置に異常,” 読売新聞, 2011年8月7日.
- (12) “シリーズ東日本大震災 空白の初期被ばく〜消えたよう素131を追う〜,” NHK, 2013年1月12日, <http://www.nhk.or.jp/special/detail/2013/0112/index.html>
- (13) 石川 宏, “福島第一原子力発電所事故による放射線量の計測と分析,” もったいない学会 WEB 学会誌, vol.6, pp.59–69, Feb. 2013.
- (14) 船橋洋一, “SPEEDIは動いているか” カウントダウン・メルtdown, 第18章, 文藝春秋, 2013.
- (15) 例えば, 青山智夫, ほか, “日食のガイガーカウンタ観測,” Journal of Computer Chemistry Japan, vol.12, no.2, pp.87–94, June 2013.

- (16) 石川 宏, “私の技術者歴 NTTのネットワークとともに40年,” 信学通誌, no.16, pp.4–13, March 2011.

(平成25年9月26日受付, 11月7日再受付)

石川 宏 (名誉員:フェロー)

工博. ナチュラル研究所所長. 1967 早大大学院修士課程了. 同年, 日本電信電話公社(現NTT)入社. 1990 交換システム研究所長, 1994 ネットワーク部長, 1997 常務取締役. 2004 NTT アドバンステクノロジー代表取締役社長. IEEE, もったいない学会, 情報処理学会, オペレーションズリサーチ学会各会員.

<http://www.ishikawa-lab.com>

E-mail: dr.ishikawa@ishikawa-lab.com

