

福島と東京における降下物に含まれる 放射性セシウムの経時変化

——学校理科の教材にするために——

桐 山 信 一

要 約

北半球では放射性核種の降下量は太平洋側では春に増大するが、放射性セシウム137の場合、現在は福島では1～2月に極大となり、7～10月にかけて極小になっている。1980年3月からのデータでは、東京と福島の間には同位相傾向（両地域とも放射性核種の降下量が春に高い）が見られた。2011年3月以降になると、このような同位相傾向が見えにくくなることがわかった。福島で生じた1～2月の極大は原発事故以前にはみられなかったものであり、原発事故による2011年3月中旬から放射能の大放出後、気象的な自然現象のピーク（極大や極小の月）が変化したと考えられる。降下物中の放射性物質の経時変化の分析は、空間線量率の継続的測定などと組み合わせれば、原子力と人間の関わり方の考察にもつながり、科目「理科課題研究」における自然環境の調査として十分な教材になると思われる。

キーワード：福島第一原発事故、放射性降下物、学校理科

1 本研究の背景と経緯

筆者のゼミでは福島第一原発事故後約2年半の経過を待って、2013年8月21～23日の間、福島市内を訪問していくつかの聞き取り調査を行った。聞き取り調査の訪問先は福島県立医大、福島市役所、除染現場（公会堂）、市立小学校などである。学生たちの学びは記事にもなっているのでここでは割愛する¹⁾。現地では、復興への息吹を感じるとともに、放射性物質の除染が進まないなど深刻な状況が伺われた。放射性物質は原発事故以来どのように変化してきているのか。

放射性物質は原発事故だけではなく地上の核実験によっても生じる。2000年あたりまでの放射性核種の降下量の時間変動については気象研究所による一連の研究がある²⁾。放射性核種の降下量は太平洋側では春に増大し日本海側では冬に増大すること（年次周期による季節変動）、北半球では中緯度地帯に降下量の極大があること、それは成

層圏—対流圏の大気交換過程に主たる原因があることがわかり、対流圏、成層圏における放射性物質の滞留時間が求められている。放射能の季節変動のような貴重な知見は生活者・市民にとって大切な情報であるにも関わらず、学校理科の学習内容として取りあげられることもない。放射性核種の各県の降下物については、毎月のデータが公表されていて³⁾⁴⁾、そのデータからも放射性核種の季節変動が読みとれるものの、データは一部の専門家や研究者を除くとほとんど閲覧されない。

本稿では、継続的なデータが存在する放射性セシウム (^{137}Cs) の、原発事故後の時間の経緯を調べその特徴を整理する。その際、福島と東京の地域比較、1980年代と原発事故後の年度比較を行う。放射能の季節変動は、理科教育にたずさわる学校の先生方にも指導していただき、原発や放射能に関する生徒の関心を高めていただきたい教育的内容である。学校理科で生徒が探究していきけるような資料を提供することは、筆者のような学校教員養成に関わる理科教員の仕事の一つでもある。原発の今後をどう考えるかは、生活者・市民が事実にもとづいて妥当な判断をすればよく、妥当な判断は原発事故からの復興を促進させることにもつながる。その事実の学習は学校理科の使命でもある。

2 原発事故後の経過

図1は福島県双葉郡における原発事故後の放射性降下物の推移であり、図2は東京都新宿区における原発事故後の放射性降下物の推移である。これらは文献3)、4)より作成した。放射性セシウム ^{137}Cs の単位は、 MBq/km^2 (Bq/m^2) であり、縦軸は対数スケールで目盛られている。両図は、2011年3月から2013年7月までの月次変動のデータであり、ここではこれを波形とよぶ。

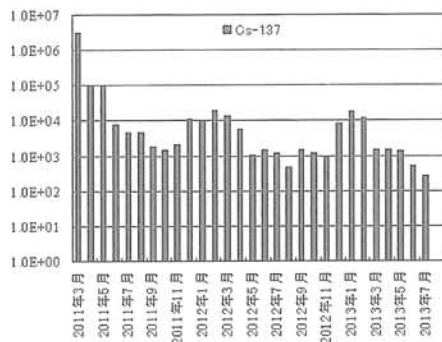


図1 福島におけるCs-137経緯

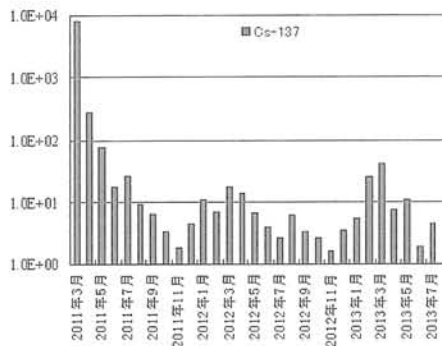


図2 東京におけるCs-137経緯

これらの波形から次のような事柄が読み取れる。

特徴1 2011年5月以降は、福島では数百～数万 MBq/km^2 、東京では数～数十

MBq/km²で推移しているので、東京は福島の2～3桁低い値になっている。

特徴2 両図とも事故後は一旦減少し、その後は1年の周期的変動が認められる。

特徴3 太平洋側では春に増大するという放射性核種の降下量が、福島では1～2月に極大となり、7～10月にかけて極小になってきている。

特長4 東京では極大は3月頃に現れ、極小は11月ごろに現れる。したがって、東京の波形は福島の波形より位相が約2ヶ月遅れている。

特徴1については、2011年3月の初期汚染から予期され得るところである。特徴2の周期的変動(季節的な増減)については、先行研究から納得される場所である。しかし、特徴3、4については、次のような疑問が生まれる。

疑問 太平洋側では春に増大するという北半球における気象的な自然現象が(春ピーク)、福島では原発事故の放射能放出によって変化したのではないかと(冬ピーク)。つまり、東京と福島の波形の位相差が発生したのではないかと。

3 福島県の見解から

福島県では、平成24(2012)年1月2日午前9時から同年1月3日午前9時にかけて採取した降下物中から比較的高い濃度の放射性セシウムを検出した。図1でも、2012年1月の値は高い。このような放射性セシウムを含む降下物が突然高濃度になった事象について、「当日は空気が乾燥し、地表面の放射性物質を含むじん埃が乾燥し舞い上がりやすくなったところにやや強い風が吹いたため、放射性セシウムを含むじん埃が地表面から舞い上がり、採取容器に降下したことによる可能性が考えられる」、「降下物の放射性物質の濃度上昇が、福島第1原子力発電所からの新たな寄与であるとは考え難い」としている⁵⁾。

4 対照データを用いた分析

ここでは、2で示した疑問における、東京と福島の波形に見られる位相差が測定年によらない固有の値なのかどうかを、対照データを用いて検討することにした。

(1) 対照データ

部分的核実験禁止条約(Partial Test Ban Treaty, PTBT)は、1963年8月にアメリカ、イギリス、旧ソ連との間で調印された核兵器の一部の実験を禁止する条約である。地下を除く大気圏内、宇宙空間および水中における核爆発を伴う実験を禁止している。正式名は「大気圏内、宇宙空間及び水中における核兵器実験を禁止する条約」(Treaty Banning Nuclear Weapon Test in the Atmosphere, in outer Space and under Water)である。

図3、図4に1980～1982年の福島と東京の降下物の推移を示す。縦軸の単位は図1、2と同じである。これらは文献4から作成した。1980年代に入ると、部分核実験禁止

福島と東京における降下物に含まれる放射性セシウムの経時変化

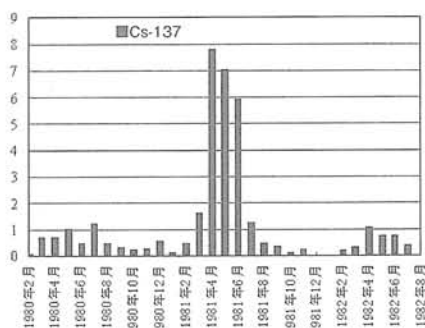


図3 福島におけるCs-137経緯

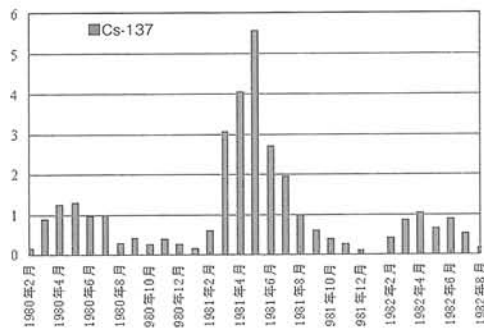


図4 東京におけるCs-137経緯

条約が締結されて20年近くが経過し、地上の放射能も0ではないにせよ地上の核実験が行われていた1950～60年代に比べて遡減してきている。図3、図4はそのような状況のデータを意味し、原発事故後の福島、東京と比較すると何らかの情報が引き出される可能性がある。対照データである図3、図4では共に1981年3～5月にかけて著しいピークがみられ、前年度、次年度に比べて数倍高い値となっている。これについては、1980年に中国で行われた大気圏内核実験の影響が出ている可能性があるが、ここでは本題からはずれぬため議論しないこととする。

(2) 福島と東京の地域差の年度比較

図1～4を用いて、福島県双葉郡と東京都新宿区の地域差の年度比較を行った。図5は図1、2を同じスケールで描いたものであり、2011年3月における地域差を示す。図6は図3、4を同じスケールで描いたものであり、1980年3月における地域差を示す。図5の縦軸は対数スケールである。2つの年度で見ても、福島と東京の波形には関連があるように見える。

図5、6に示されたそれぞれ2つの波形の関連をどのように考えたらよいのだろうか。単なる相関関係を見るだけでは次のような不備がある。

- ・相関係数はそれぞれの大きな数値のデータに左右される。
- ・相関係数では2つの波の位相差の検討ができない。
- ・フーリエ分解でスペクトルの固有周期を調べるにはデータ数が少ない。

これらのことから降下物の直接の相関を見ることはせず、次のような考えで分析を進めた。フーリエ分解で固有周期を出すことができなくても、両者はともに季節変動のような傾向が見られることは事実であり、それなりの相関はある。

月間降下物そのもの(yとする)の相関をとるのではなく、その時間的な変化率(傾き) dy/dt の相関をとることは両者の変動を比較することになる。したがって、 dy/dt の相関によって位相差の有無を検討できるのではないかと考えた。ここでは、時間的な変化率を1ヶ月単位の差分にとり、次のように単純化した。

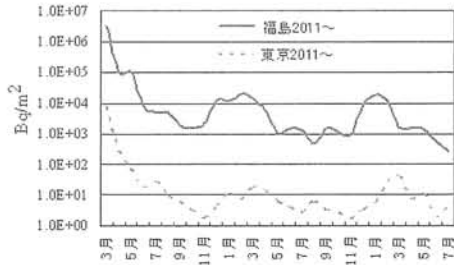


図5 2011年3月からの地域差

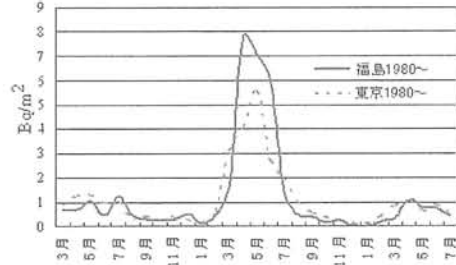


図6 1980年3月からの地域差

$$(dy/dt)_{東京} \doteq (\Delta y / \Delta t)_{東京} = \Delta y_{東京} \quad \Delta t = 1 \text{ month} \quad \dots\dots (1)$$

$$(dy/dt)_{福島} \doteq (\Delta y / \Delta t)_{福島} = \Delta y_{福島} \quad \Delta t = 1 \text{ month} \quad \dots\dots (1)'$$

Δy は次のように簡単に求められる。東京を例にとって説明する。

例) 2012年1月 11 Bq/m² $\Delta y = (7 - 11) / 1 = -4 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2} / \text{month}$

2012年2月 7 Bq/m² $\Delta y = (18 - 7) / 1 = 11 \quad \text{〃}$

2012年3月 18 Bq/m² $\Delta y = (4 \text{月の値} - 18) / 1 = \dots$

$\Delta y_{東京}$ と $\Delta y_{福島}$ を平面上にプロットしたとき、東京と福島が同位相ならば第1象限、第3象限に集まり、逆位相ならば第2象限、第4象限に集まる。図7に2011年3月からの両地域の差分プロット、図8に1980年3月からの両地域の差分プロットを示す。

図7では第1～4象限にデータがばらつき同位相傾向が弱く、図7では第1象限、

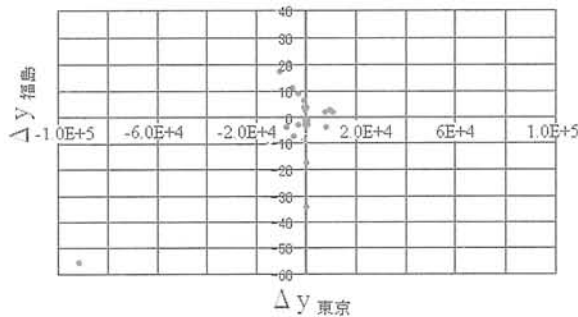


図7 2011年3月からの差分プロット

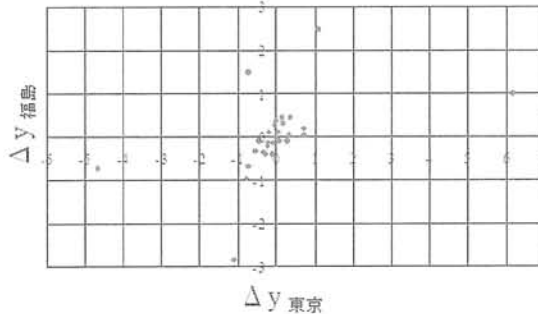


図8 1980年3月からの差分プロット

第3象限にデータが集まっていて同位相傾向が強いことが伺われる。

表1 地域差の年度比較

	I・III	II・IV
1980～	21	5
2011～	15	13

これを定量的に検討するために、同位相傾向を示す第1象限と第3象限に入ったデータの数（I・IIIと示す）、逆位相傾向を示す第2象限と第4象限に入ったデータの数（II・IVと示す）を4分表にして表1に示す。同位相傾向（I・III）と逆位相傾向（II・IV）の出方に、年度による差が認められるかどうかを独立性の検定（ χ^2 検定）で調べた。その結果、下記に示すように両年度に5%の有意差が見られた。

$$\chi^2=4.49 \quad (p=0.034, \text{上側検定})$$

したがって、福島と東京には、1980年3月からの差分プロットに見られた同位相傾向が、2011年3月からの差分プロットでは見えにくくなったことが示された。

(3) 年度差の地域比較

次に、図1～4を用いて2つの年度差の地域比較を行った。図9は図1、3を同じスケールで描いたものであり、福島における年度差を示す。図10は図2、4を同じスケールで描いたものであり、東京における年度差を示す。図9、10の縦軸は対数スケールである。福島、東京の両方にいえることは、同位相傾向も逆位相傾向も混在しているように見え、2つの年度の波形には明確な関連があるようには見えない。

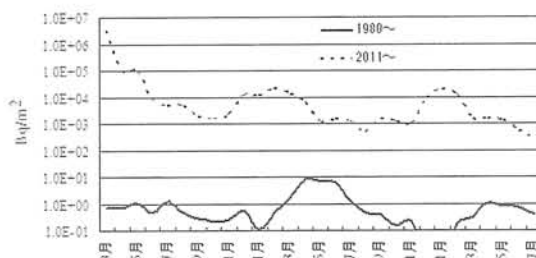


図9 福島における両年度差

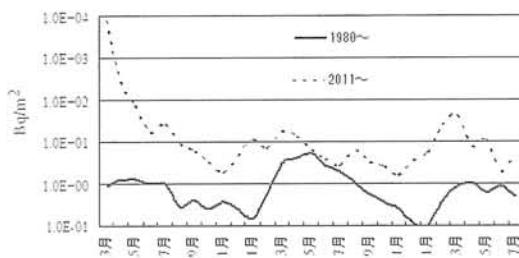


図10 東京における両年度差

表2 年度差の地域比較

	I・III	II・IV
福島	13	9
東京	9	14

(2)と同様の方法で作った両図の差分プロットから作成した4分表を表2に示す。その際、2011年7月までは原発事故後の放射能の単調減少が見られるため、8月以降のデータを用いて差分プロットをつくった。同位相傾向(I・III)と逆位相傾向(II・IV)の出方に、地域による差が認められるかどうかを独立性の検定(χ^2 検定)で調べた。その結果、下記に示すように両年度に有意差は見られなかった。

$$\chi^2=1.79 \quad (p=0.18, \text{上側検定})$$

したがって、1980年3月からの差分プロットと2011年3月からの差分プロットの年度差における同位相と逆位相の混在傾向は、福島でも東京でも変わらず、両地域の比較では有意義な情報は見つからなかったと考えられる。

(4) 交差相関から

図1, 2のような継続する2つの時系列データが何らかの周期性をもつとき、2つのデータを前後に1期前、2期前と時点をずらした場合、2つのデータ間での相関係数が変化する。このようなときの相関を交差相関とよぶ。交差相関を求めることにより、2つのデータの位相差(どちらが先行しているか)を調べることができる⁶⁾。SPSSを用いて交差相関を調べた結果、次のような傾向がみられた。

- ①2011年からの福島と東京のデータ(図1, 2)における交差相関では、東京が福島より位相が1~2ヶ月遅れている。
- ②福島の2011年からと1980年からの2年度のデータ(図9)の交互相関では、1980が2011より位相が3ヶ月遅れている。
- ③東京の2011年からと1980年からの2年度のデータ(図10)の交互相関では、交互相関は観察できなかった。

傾向①の結果は、1で示した特徴4が数値として出たものである。また、傾向②からは1で示した特徴3、特に福島での2012年度以降に明確にみられる冬ピークが数値として出たもの考えられる。

5 結 果

(1) 対照データを用いた分析から

先行研究にあるように、北半球では放射性核種の降下量は太平洋側では春に増大していた。つまり、1980年3月からの差分プロットでは両地域における同位相傾向(両

地域とも放射性核種の降下量は春ピークが見られた。ところが、4(2)で示されたように、2011年3月からの差分プロットになると、このような同位相傾向が見えにくくなった。このように、対照データを用いて地域差の年度比較を行うことによって、

ア) 特徴3で示した福島の傾向(冬ピーク)は、1980年3月からの傾向(春ピーク)とは異なるものであること

イ) 特長4に見られたように、東京では3～4月に極大が現れ、11月ごろに極小が現れるのは、1980年3月からの傾向(春ピーク)と同様のものであること

が示された。交差相関の結果③も、イ)を支持している。東京の波形が福島の波形より位相が約2ヶ月遅れる(福島が2ヶ月ほど早まる)のは、東京ではこれまでの気象を引きついているからではないか。福島における冬ピークは原発事故以降に出現したものである。

(2) 福島県の見解についての検討

(1)で示したように、1～2月のピークは事故後特有のものである。2012年1月2～3日にかけての高濃度放射性セシウムの検出は、その日に放射性セシウムを含むじん埃が地表面からの舞い上がったとするだけでは、その日の説明としてはそれでよいかも知れぬが、冬ピークがなぜ生じているのか、これまでの春ピークがなぜ冬になったのか合理的に説明できないのではないか。文献2)イ)においても、再浮遊(一旦地表に沈着したものが、表土粒子と共に再び大気中に浮遊する現象)には観測地の近傍以外の起源があり、表土粒子が大規模かつ長距離を輸送される黄砂など風送塵が放射能を運んでいることが示されている。福島ではこの長距離輸送の周期変動に、空気が乾燥する冬季に近傍の土壤再浮遊の影響が大きく加わって、自然の周期変動が変化したように見えるという可能性がある。しかし、最も乾燥すると考えられるのは相対湿度の低い時期であるが、2012、2013年度の相対湿度の月平均値のデータは次のようになっている⁷⁾。

東京 1～2月に極小(43～49%)

福島 3～4月に極小(56～67%)

このデータからは、福島では近傍の土壤再浮遊は3～4月に起こりやすいことになり、冬ピークは説明しにくいともいえる。

6 理科教材としての検討

高等学校学習指導要領では、新科目「理科課題研究」が新設されている⁸⁾。自然に対する知的好奇心や探究心を高め、科学的な思考力・表現力の育成を図る観点から、従前の「Ⅱを付した科目」の中に位置付けていた課題研究が、標準単位数1単位の科目として独立に設定されたものである。「理科課題研究」は、

- ・特定の自然の事物・現象に関する研究
- ・先端科学や学際的領域に関する研究
- ・自然環境の調査に基づく研究
- ・科学を発展させた実験に関する研究

の4領域に関して、課題を設定して科学的に探究する能力と態度を育てるとともに創造性の基礎を培おうとする。本稿で示したようなデータは誰でもいつでも取得することができ、データには自然現象（地球的規模の気象）と人為的現象（原発事故の放射能汚染）が複雑に絡んでいる。したがって、降水物中の放射性物質の経時変化の分析は、空間線量率の継続的測定などと組み合わせれば、原子力と人間の関わりの考察にもつながり、「自然環境の調査に基づく研究」として十分な課題研究になると思われる。福島と東京以外の太平洋側地域との比較、2011年以降と1990年代の比較などを行えば、様々な知見が得られるのではないだろうか。

引用・参考文献

- 1) 聖教新聞2013年9月11日付
- 2) 気象研究所HP：人工放射性降水物（死の灰のゆくえ）
 - ア) http://www.mri-jma.go.jp/Dep/ge/ge_report/2003Artifi_Radio_report/chapter1.htm.
 - イ) http://www.mri-jma.go.jp/Dep/ge/ge_report/2009Artifi_Radio_report/Chapter1.html
 - ウ) 2009Artifi_Radio_report.pdf など
- 3) 原子力規制委員会HP：<http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/195/list-1.html>
- 4) 原子力規制庁 環境放射線データベース：
<http://search.kankyo-hoshano.go.jp/servlet/search.top>
- 5) 福島県災害対策本部（原子力班）：定時降水物から放射性セシウムが比較的高い濃度で検出された要因について、[koukabutsu-youin0206.pdf](#) 2012年2月6日
- 6) 石村貞夫：SPSSによる時系列分析の手順（第2版），東京図書株式会社 2006年
- 7) 気象庁 気象統計情報：<http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>
- 8) 文部科学省：高等学校学習指導要領解説理科編 理数編，実教出版株式会社 2009年12月

Monthly change of the ^{137}Cs included in radioactive fallout after the first Fukushima nuclear plant accident

—Use data of radioactive fallout for science education—

Nobukazu KIRIYAMA

Abstract

In the Northern Hemisphere, the quantity of descent of the radionuclide increases on the Pacific side in spring. In Fukushima, the quantity of descent of ^{137}Cs becomes maximum from January to February and becomes minimum from July to October. By the data after March, 1980, same phase tendency was seen between Tokyo and Fukushima (Quantity of descent of the radionuclide is both high in spring). After March, 2011, it became hard to show this same phase tendency. Maximum from January to February in Fukushima was not seen before the nuclear plant accident. It is thought that the peak of the weather-like natural phenomenon (maximum and minimum moon) changed after great release of the radioactivity from the middle of March by the nuclear plant accident. The analysis of descent of the radionuclide can investigate the natural environments in the high school subject “science study”. It leads to consideration of relation between human and atomic energy if combined with the continuous measurement of the space dose rate. And it becomes enough teaching materials.

Keywords: The first Fukushima nuclear plant accident, Radioactive fallout, science education