

大規模原子力事故時の遠隔地における放射線被ばくへの対処 ー 長崎に飛来した福島第一原子力発電所の放射性物質から の推測

袁 軍*1, 世良耕一郎*2, 高辻俊宏*1

*1 長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科；長崎県長崎市文教町 1-14(〒852-8521)；Email: takatsuj@nagasaki-u.ac.jp；FAX: 095-819-2754

*2 岩手医科大サイクロトロンセンター；岩手県岩手郡滝沢村滝沢宇留が森
348-58(〒020-0713)

図表の数：16（図の数：14，表の数：2）

別刷り請求先（氏名と連絡先）：高辻俊宏，長崎県長崎市文教町 1-14 長崎大学
大学院水産・環境科学総合研究科（〒852-8521）

Email

袁 軍 engun426@yahoo.co.jp

世良耕一郎 ksera@iwate-med.ac.jp

高辻俊宏 takatsuj@nagasaki-u.ac.jp

（通常の連絡は高辻までお願いします。）

Measures to protect against radiation due to a large-scale nuclear accident of distant place — radioactive materials in Nagasaki from the Fukushima Daiichi nuclear power plant indicate

YUAN Jun^{*1}, SERA Koichiro^{*2}, TAKATSUJI Toshihiro^{*1}

*1Graduate School of Fisheries Science and Environmental Studies ;
Nagasaki University 1-14 Bunkyo-machi, Nagasaki 852-8521, Japan

E - mail : takatsuj@nagasaki-u.ac.jp ; Fax: 095-819-2754

*2Cyclotron Research Center, Iwate Medical University
348-58 Tomegamori, Takizawa, Iwate 020-0173, Japan

Abstract Objective: To investigate human health effects about radiation exposure due to future possible nuclear accidents at distant places and other various findings through analyzing the radioactive materials contaminating atmosphere of Nagasaki due to the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident.

Methods: Concentrations of radioactive materials in the aerosol were measured contained in the atmosphere of Nagasaki using a germanium semiconductor detector from March 2011 to March 2013. Internal exposure dose was calculated according to ICRP Publ. 72. Air trajectories were analyzed by NOAA and METEX web-based systems.

Results: $^{134,137}\text{Cs}$ were repeatedly detected. The air trajectory analysis

showed that the $^{134,137}\text{Cs}$ have flown directly from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant in March to April 2011. However the direct air trajectories were rarely shown after the time even in the period $^{134,137}\text{Cs}$ were detected after the term. The activity ratios ($^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$) of almost the samples converted to the values at March 2011 were about unity. It strongly suggests that the $^{134,137}\text{Cs}$ detected were mainly originated from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident in March 2011. Although the $^{134,137}\text{Cs}$ concentrations per air volume were tracer amount and the human health effects due to the internal exposure with the inhalation was expected negligible, the specific activities (concentrations per aerosol mass) were relatively high.

Conclusion: It was realized that future possible nuclear accident may cause severe radioactive contaminations which may demand radiation control of farm goods to more than 1000 km distant places.

KEY WORDS: Activity ratio(放射能比); Aerosol(エアロゾル); Radioactivity concentration(放射能濃度); Air trajectory(大気流跡線); Fukushima Daiichi nuclear power plant(福島第一原子力発電所)

1 緒 言

2 福島第一原子力発電所事故発生後、発電所の近くの土壌中に多くの放射性同
3 位元素(^{131}I , ^{132}Te , ^{132}I , ^{134}Cs , ^{136}Cs , ^{137}Cs , ^{140}Ba , ^{140}La , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{95}Nb ,
4 $^{110\text{m}}\text{Ag}$)が検出された(1-2)。これらは発電所から放出されたものが大気に乗って
5 移動し、エアロゾルに吸着され、雨や雪に吸着され降下、あるいは重力によっ
6 て直接降下したものと考えられる。いずれにしても、これらの放射性同位元素
7 は大気の流れによって広範囲に分布するようになったと考えられるが、どのよ
8 うな範囲に降下したかは必ずしも明らかではない。長崎は、福島第一原子力発
9 電所から南西の方角に遠く離れており、大気は通常西から東に移動することを
10 考えれば、同発電所事故の影響は少ないとの印象がある。しかしながら、実際
11 には長崎市の北西部にあるながさき県民の森では 2011 年 3 月 23 日～4 月 27
12 日と 7 月 20 日～27 日に ^{134}Cs と ^{137}Cs ($^{134}, ^{137}\text{Cs}$)が検出されたこと、これが同
13 発電所事故の影響である可能性が高いことを我々は報告した(3-4)。また、長崎
14 県環境保健研究センターにおいても、屋上で採取した降下物から 2011 年 3 月
15 ～5 月に、 $^{134}, ^{137}\text{Cs}$ が検出されたことが報告されている(5)。その後も長崎での
16 大気中浮遊物の中に $^{134}, ^{137}\text{Cs}$ が何回も検出されているのでこれについて報告
17 し、人体などにどの程度の影響があるのか、今回程度の規模の原子力事故が再
18 び起これば、事故の状況や気象条件によって、どの程度の影響が考えられるの
19 かを検討する。

21 方 法

22 1. 試料採取

23 大気中浮遊物（エアゾル）の採取には、ハイボリュームエアサンプラー柴
24 田科学製 AH600-F(吸収流量：700L/min, 一週間積算流量：約 7000m³)とアド
25 バンテック QR-100 シリカ繊維濾紙（捕集効率：99.99% ,

1 0.3 $\mu\text{mDop}\%$)203×254mm を用いた。試料採取は、2011年3月～2013年3月に
2 かけて行った。長崎大学(北緯 32.785701°東経 129.86479°)とながさき県民の森
3 (北緯 32.908825°東経 129.742425°)の場所を示す(Fig.1)。試料はほぼ1週間に
4 わたって採取した。採取後サンプルから4分の3を切り分け、放射能測定のため
5 の試料とした。残りの4分の1のうち、一部(3cm×3cm)を粒子線励起X線
6 (PIXE, Particle Induced X-ray Emission)による元素分析用に使用し、残
7 りは予備試料として保管した。なお、PIXEは陽子などの加速荷電粒子を試料
8 に照射し、発生する特性X線を測定することによって元素分析をする方法であ
9 る(6)。

10

11 2. 測定方法

12 エアロゾルの質量は、エアロゾル採取後の濾紙の質量から、エアロゾル採取
13 前の濾紙の質量を差し引いて求めた。なお、濾紙は吸湿性があるため、質量は、
14 除湿機能付きのデシケーター(サンブラテックオートデシケーターAM-3型)で
15 水分を取り除いたのち測定した。測定には、風防に帯電防止用の導電性ガラス
16 を採用した分析用電子天秤(精度 0.0001g)を用いた。

17 放射能の測定は、ガンマエックス型ゲルマニウム半導体検出器を用いて行っ
18 た。濾紙をポリエチレンラップに包み、金型に入れてからプレス器で円盤状に
19 成形したのち軟膏容器(U-9容器と同型のもの)に入れて測定した。

20

21 3. 吸入被ばくの計算

22 吸入摂取による預託実効線量は、以下の式で表される。

23 摂取量 = 平均空気中濃度 × 一日あたりに吸入する空気量 × 日数

24 内部被ばく線量 = 摂取量 × 実効線量係数

25 計算に際しては、ICRP Publ. 72 (7)の一般公衆の見積と同様、1日 22.21 m³

1 の空気を吸入する人がサンプリング地点に常時滞在していたと仮定した。実効
2 線量係数も一般公衆のものとして、ICRP Publ.72 のものを用いた。

3

4 **4. 大気流跡線分析**

5 アメリカ海洋大気庁(NOAA) HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian
6 Integrated Trajectory Model)(8) と国立環境研究所地球環境研究センター
7 METEX (Meteorological Data Explorer) (9)のウェブサイトを利用して、
8 大気流跡線分析を行った。HYSPLIT の使用規約に従い、以下の使用規約への
9 リンクを示す。

10 http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT_disp.php

11 いずれの Web サイトについても、大気の出発時あるいは到着時の緯度経度高度
12 を入力すると、過去の風向風速などのデータから、大気がどのような経路で進
13 んでいくか、あるいはどのような経路で進んできたかが計算される。

14

15 **5. PIXE 分析との比較**

16 津波によって打ち上げられ飛散した重金属類は、原発事故由来の放射性物質
17 と相並んで恐れられている(10)。エアロゾルの PIXE 分析は、日本アイソト
18 プ協会仁科記念サイクロトロンセンター(NMCC, 岩手県滝沢市)で実施した。
19 重金属類を含む元素分析のデータは、共同利用研究成果報文集(3)で発表済みで
20 あるが、放射性セシウムとの関係を詳細に検討して、その起源が津波由来であ
21 るかどうかを検討する。つまり、原発事故由来の放射性物質が、津波由来の重
22 金属類のトレーサーとして利用できないかを検討する。

23

24

結果と考察

25 **1. 検出された ^{134}Cs と ^{137}Cs , ^{210}Pb の濃度**

Table.1-2

Fig.2-3

1 採取したエアロゾルに、前回の報告(3-4)も含め、2011年～2013年3月に検
2 出された ^{134}Cs と ^{137}Cs 、 ^{210}Pb について、エアロゾル質量あたりの放射能濃度
3 (比放射能)(Table .1, Fig .2)と、吸引空気体積あたりの濃度(Table .2, Fig .3)
4 を示す。 ^{210}Pb はラドン由来の半減期22.3年の天然放射性核種である。ここで
5 原発事故由来でない ^{210}Pb を示した理由は、その壊変生成核種 ^{210}Po の有害性
6 がある。 ^{210}Po はガンマ線スペクトロメトリーで測定することはできないが、
7 ^{210}Pb の壊変によって常に生成され、半減期が比較的に短いため(138日)、化学的
8 性質の違いによる分離が激しくなければ放射平衡に近い状態となり、 ^{210}Pb と
9 同程度の放射能で共存すると考えられる。 ^{210}Po は α 放出核種であって、実効
10 線量係数が大きく吸入摂取すると有害性が大きいとされている(7)。したがって、
11 エアロゾル内の $^{134,137}\text{Cs}$ が顕著な健康影響を与えるかどうかを検討する場合に
12 は、 ^{210}Pb との比較が必要であると考えられる。ただしエアロゾル中の ^{210}Po
13 の ^{210}Pb に対する比は、芽吹きから135日目の松葉に付着したものの場合には
14 0.25、500日目では0.5程度という見積もある(11)。しかしながら、松葉には
15 ^{210}Pb が選択的に沈着している、風雨による脱離があるなどと考えられている
16 ことから、1年程度使用したエアフィルタでは、この割合はもっと放射平衡に
17 近く、1に近いとも考えられる。ここでは、安全側に見積もって、割合は1に
18 近いものとする。

19 ^{137}Cs は14回検出され、 ^{134}Cs は10回検出された。 ^{134}Cs の比放射能および
20 吸引空気体積あたりの濃度が一番高かったのは長崎大学における2011年8月
21 18日～8月24日の $3.06 \times 10^5 \text{Bq/kg}$ と $3.46 \times 10^0 \text{mBq/m}^3$ であった。 ^{137}Cs が一
22 番高かったのも同じ試料で、 $3.93 \times 10^5 \text{Bq/kg}$ と $4.44 \times 10^0 \text{mBq/m}^3$ であった。こ
23 のときの放射性セシウムの比放射能は高く、飯舘村蕨平の土壌に匹敵した(1)。
24 これは、放射性物質がエアロゾルとして大気によって運ばれるとき、遠方にお
25 いても、濾過により大気から分離すると、高い比放射能が保たれる場合がある

1 ことを示唆している。比放射能の変動の方が吸引空気体積あたりの放射能濃度
2 よりも変動が小さい傾向がある。このことは、吸引空気体積あたりの放射能濃
3 度がエアロゾルの量に連動している傾向があることを意味するが、必ずしもそ
4 うなっていない場合もある。 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs が検出された週のエアロゾル粒子の
5 空气中質量濃度(kg/m^3)を示す(Fig.4)。ながさき県民の森では、 ^{137}Cs の吸引空
6 気体積あたりの濃度が 2012 年 10 月 23 日～31 日に 2011 年 4 月 13 日以降最
7 も高くなり、2012 年 7 月 25～8 月 1 日の約 6 倍となったが、空气中質量濃度
8 は約 0.64 倍にすぎず、比放射能は約 9.4 倍に達した。

Fig.4

9 サンプルング地点での吸入被ばくを計算したものを示した(Table.2)。
10 $^{134,137}\text{Cs}$ が検出された一週間の $^{134,137}\text{Cs}$ による内部被ばく量はいずれも
11 $3.8 \times 10^{-2} \mu\text{Sv}$ より小さく、 ^{210}Pb 、 ^{210}Po によるものに比べても小さいので、大気
12 の吸入被ばくによる人体への健康影響は個人レベルではほとんど問題にならな
13 いと考えられる。

Table.2

14 空気体積あたりの放射能濃度は微量でも、エアロゾルの比放射能は高くなる
15 ため、外気を建物内に取り入れる場合のエアフィルタを職業的に取り扱う者な
16 どについては、内部被ばくへの注意が必要であったと考えられる。しかし、エ
17 アロゾルには $^{134,137}\text{Cs}$ の放射能を上回る ^{210}Pb が含まれていたことから、 134,
18 ^{137}Cs の健康影響は顕著ではなく、 ^{210}Pb 、 ^{210}Po に関しては、平常時においても
19 マスクを着用するなどの内部被ばくへの対策が必要であると考えられる。たと
20 えば、放射線施設は、施設内での内部被ばくを防ぐため、換気量を大きくして
21 あり、その一例は、 $36450\text{m}^3/\text{h}$ にもなる(12)。ながさき県民の森で見られたエ
22 アロゾルの空气中質量濃度の $5 \times 10^{-8} \text{kg}/\text{m}^3$ を適用して、一日 8 時間、1 週間 5
23 日運転を続けたとすると、外気の取り入れ口のエアフィルタに集まるエアロゾ
24 ルは年間 3.8 kg となる。ながさき県民の森で観測された ^{210}Pb の平均比放射能
25 は $3.2 \times 10^5 \text{Bq}/\text{kg}$ であるから、エアフィルタの清掃作業などを行いこのエアロ

1 ズルの 1%を吸入したとすると、 ^{210}Pb を 1.22×10^4 Bq 吸入したことになる。
2 ^{210}Po も同程度含まれているとして Table2 と同様に内部被ばく線量を求めると、
3 約 54 mSv にもなる。一般公衆に許容される被曝線量の年間 1mSv と比べれば
4 高く、防護対策が必須であると考ええる。通常のマスクによって ^{210}Pb とその壊
5 変生成物である ^{210}Po がどの程度防護できるかについては、今後検証が必要で
6 ある。 $^{134}, ^{137}\text{Cs}$ による内部被ばくについては、その放射能値および実効線量係
7 数から、3桁以上小さいことがわかる。マスクによって、 $^{134}, ^{137}\text{Cs}$ による内部
8 被ばくも防げるかについても検証が必要ではあるが、防げる可能性が高いもの
9 と考えられる。

10

11 2. ^{134}Cs と ^{137}Cs の放射能濃度の比

12 2つの核種が検出されているものに対して半減期を用い、放射能値を採取日
13 時から 2011年3月11日に逆算して作成した ^{134}Cs と ^{137}Cs の放射能比を示す
14 (Fig.5)。いずれも1に近いということが分かった。今回の災害によってもたら
15 された放射性セシウムの ^{134}Cs と ^{137}Cs 放射能比について報告されたデータを
16 見ると、災害直後の値に換算するとほぼ 1.0 となっていて(13-14)、我々の測定
17 した値はいずれもこれに近い値を得ている。このことは、これらの放射性セシ
18 ウムがすべて主として 2011年3月ごろ福島第一原子力発電所から放出された
19 もの由来である可能性を強く示唆している。 ^{137}Cs のみが検出されているもの
20 については、他の発生源からの ^{137}Cs であるとも考えられるが、その濃度は低
21 く、すべて当該原発事故由来と仮定した場合に期待される ^{134}Cs 濃度はさらに
22 低く、検出限界を下回っていると推測されるので、これも、主として事故由来
23 である可能性がある。

24

25 3. 福島第一原子力発電所からの空気の軌跡

Fig.5

1 3.1 大気流跡線分析

2 前回の報告(3-4)では、ながさき県民の森では、2011年4月6日～4月13日
3 に比較的高い濃度の放射能が検出されたことを示した。そして、2011年4月6
4 日～4月13日の一週間の福島第一原子力発電所上空の空気の軌跡により、放射
5 性核種は当該発電所から長崎に直接飛来したであろうことも分かった。以後に
6 $^{134,137}\text{Cs}$ が検出された時期には、当該発電所からの放出は少ないので、いった
7 ん地上に沈着した核種が再浮遊したものが飛来した可能性がある。しかし、沈
8 着した核種は当該発電所周辺に多く分布していることから、当該発電所周辺か
9 ら長崎周辺に至るような大気前方流跡線が得られるのではないかと考えたが、
10 後述のように、そのような流跡線は得られなかったため、放射性核種が飛来し
11 た時期に関しては、福島第一原子力発電所からの大気前方流跡線と長崎の大気
12 後方流跡線の両方を分析し、検討した。

13

14 3.2 福島第一原子力発電所の上空の大気前方流跡線

15 福島第一原子力発電所(北緯 37.421572°東経 141.03261°)の上空からの大気
16 前方流跡線を調べた。 $^{134,137}\text{Cs}$ が検出された採取期間の始まる2日前に出発し
17 たものから採取期間の終わる1日前に出発したものの一部を示す(Fig.6-9)。一
18 つの図についてのそれぞれの線は出発時刻が異なるものを12時間ごとに示し
19 ている。出発時の高度は0mを選択した。追跡する時間は72時間を指定した。
20 発電所から長崎上空までは1日程度はかかるので、採取期間の終わる1日前以
21 降の流跡線は採取期間のうちに長崎上空に達することはほとんどない。
22 $^{134,137}\text{Cs}$ が検出された採取期間に対応する2012年6月11日11時(UTC 2時、
23 以下同じ)～19日11時(Fig.6), 2012年7月23日11時～31日11時, 2012年
24 10月8日11時～16日11時(Fig.7), 2012年10月21日11時～30日11時,
25 2012年11月26日11時～12月4日11時, 2013年1月21日11時～29日11

Fig.6-9

1 時(Fig.8), 2013年2月5日11時~12日11時(Fig.9)には, 福島から長崎方面
2 への流跡線はない。

3

4 3.3 長崎大学とながさき県民の森の上空の大気後方流跡線

5 長崎大学およびながさき県民の森の高度0mに向かう後方流跡線を調べた。

6 ^{134}Cs , ^{137}Cs が検出された採取期間に到達するものの一部を示す(Fig.10-13)。

7 一つの図についてのそれぞれの線は到達時刻が異なるものを12時間ごとに示
8 している。到達時の高度は0mを選択した。追跡する時間は72時間を指定した。

Fig.10-11

9 長崎大学で $^{134,137}\text{Cs}$ が検出された採取期間である2012年6月20日11時~13

10 日11時(Fig.10), 2012年8月1日11時~7月25日11時, 2012年12月5日

Fig.12-13

11 11時~11月28日11時, 2013年1月30日11時~23日11時(Fig.11), なが

12 さき県民の森で $^{134,137}\text{Cs}$ が検出された採取期間である2012年8月1日11時

13 ~7月25日11時, 2012年10月17日11時~10日11時(Fig.12), 2012年10

14 月31日11時~10月23日11時, 2013年2月13日11時~7日11時(Fig.13)

15 のうち, 2012年6月13~20日長崎大学採取分(Fig.10)と2012年10月10~

16 17日ながさき県民の森採取分(METEXのみ, Fig.12)には, 発電所近くからの
17 流跡線が見られるが, 他には発電所近くからの流跡線はない。

18

19 3.4 大気流跡線分析と放射性セシウム

20 大気前方流跡線と大気後方流跡線の分析により, 一部を除いて, 福島第一原
21 子力発電所からの大気が直接長崎まで来ることは, 考えにくいことがわかった。

22 しかし, ^{134}Cs と ^{137}Cs の放射能濃度比は, すべて2011年3月ごろに福島第一
23 原子力発電所から放出されたもの由来であることを示唆しているので, 高濃度

24 の $^{134,137}\text{Cs}$ を含むエアロゾルが広域に広がり地上に降下し, 微粒子のまま再浮

25 遊して長崎に飛来したものか, エアロゾルのまま大気中に長時間滞留していた

1 か、いずれかであると考えられる。しかし後者ならば、地球規模の大きな大気
2 循環に乗ってきたと考えられるので、拡散により、もっと薄められ、他の発生源由
3 来のものが加えられるため、 ^{137}Cs の比率が高まると考えられる。長崎大学構内
4 においても、蘚苔類から $^{134,137}\text{Cs}$ が検出されている。たとえば、北緯 32.7862° 、
5 東経 129.8662° で 2014 年 4 月 10 日に採取した蘚苔類からは、 $2.19 \pm 0.23 \text{ Bq/kg}$
6 の ^{134}Cs と $5.56 \pm 0.27 \text{ Bq/kg}$ の $^{134,137}\text{Cs}$ (乾燥状態、採取日換算) が検出され
7 ている。これを 2011 年 3 月 11 日に換算すると、それぞれ $6.19 \pm 0.66 \text{ Bq/kg}$ 、
8 $6.00 \pm 0.30 \text{ Bq/kg}$ となり、ほぼ 1 : 1 の割合となる。従って、これらの蘚苔類
9 に含まれる $^{134,137}\text{Cs}$ は、大部分が福島原発事故由来と推測される。このことか
10 らすれば、地上には至る所に $^{134,137}\text{Cs}$ が堆積しており、これらが再浮遊してエ
11 アロゾルに混入した可能性は高いと考える。

12 大気後方流跡線(Fig.10-13)を見ると、多くが朝鮮半島も含め陸地を長距離に
13 わたり経由しており、 ^{134}Cs と ^{137}Cs の飛来が再浮遊によることを否定しない。

14

15 3.5 放射性セシウムと津波被害地における重金属汚染

16 津波被害地における重金属汚染が問題となっている(10)。図らずも原発事故
17 により放出された放射性物質がトレーサーとなり、大気の流れによる重金属汚
18 染の地理的な広がり状況を明らかにしてくれる可能性がある。

19 ながさき県民の森のエアロゾルの PIXE 分析(3)によれば、放射性セシウムの
20 飛来した 2011 年 4 月 6 日～4 月 13 日に Fe, Mg の濃度が高くなっており、津
21 波被害の影響が長崎に及んでいることも考えられる。しかしながら、一年後の
22 2012 年 4 月 4 日～12 日も Fe, Mg の濃度が高い。2012 年 4 月 2 日 11 時～11
23 日の福島第一原子力発電所上空からの前方流跡線(Fig.14)によれば、西に向か
24 ってはいない。なお、この一週間に $^{134,137}\text{Cs}$ も検出されていない。したがって、
25 Fe, Mg の高濃度は、主として原発事故で $^{134,137}\text{Cs}$ で汚染されている地域由来

Fig.14

1 ではない。Fe, Mg の飛来は津波被害の影響以外でもおこり, 2011 年 4 月 6 日
2 ~4 月 13 日の高濃度の原因は, 他にある可能性があることがわかった。

3

4 3.6 同程度の事故が起こった場合の放射能汚染の程度

5 福島第一原子力発電所事故では, 外部に放出された放射性物質は炉心に存在
6 した物のごく一部であり ^{137}Cs に関しては, 0.85%と見積もられている(15)。ま
7 た, 大気中に放出された放射性物質のかなりの部分が海上に向かった(16)こと
8 も考慮すると, 今後原子力事故が起こった場合に地上に降り注ぐ放射性物質の
9 濃度は, 今回観測された濃度の 100 倍以上となる可能性がある。仮に 100 倍と
10 なった場合, Table.2 より, ^{134}Cs と ^{137}Cs による内部被ばく線量は最大 6 日間
11 で $3.8 \mu\text{Sv}$ であり, これが仮に 1 年間続いても $230 \mu\text{Sv}$ にしかならない。一方,
12 エアフィルタに集まるエアロゾルの濃度は, Table.1 より, $7 \times 10^7 \text{ Bq/kg}$ となり,
13 ^{210}Pb の 100 倍以上となるから, 被曝を避けるための特別な取扱が必要となる。
14 また, 蘚苔類の濃度は ^{134}Cs と ^{137}Cs で 1200 Bq/kg となる。このことから, 農
15 作物の濃度は現在の規制基準値の 100 Bq/kg を超える恐れもあると考えられる。

16

17

17 結 論

18 福島第一原子力発電所事故によって放出された放射性物質は, 1140km 離れた
19 た長崎にまで幾度となく到達している。しかし大気の吸入摂取による内部被ば
20 く線量は人体への影響が無視できる微々たるものであった。エアロゾルが集ま
21 る空調設備のフィルターなどでは注意が必要な濃度になったと考えられるが,
22 事故由来でない天然放射性物質による危険性のほうが高く, もともと日常的に
23 防護措置が必要であると考えられる。

24 将来同程度の事故が起こった場合に, 地上に降り注ぐ放射性物質の濃度は今
25 回観測された濃度の 100 倍以上となる可能性があるが, 1000km 以上離れた地

1 域では、大気の吸入摂取による内部被ばくについては少なくとも ^{134}Cs と ^{137}Cs
2 によっては年間 $1\mu\text{Sv}$ を超える恐れは少ないと考えられる。しかしながら、空
3 調設備のエアフィルタなどでは危険な濃度レベルとなる恐れがある。また、農
4 作物の濃度は現在の規制基準値の 100 Bq/kg を超える恐れがある。福島第一原
5 子力発電所事故と同程度以上の原子力事故が再度発生すれば、半径 1000 km 以
6 上の範囲に無視できない被害が及ぶ恐れがあると言える。

7

8

謝 辞

9 この研究を支えてくれた多くの長崎大学環境科学部、長崎大学大学院水産・
10 環境科学総合研究科の学生や教職員の方々に心より感謝いたします。

11 本研究は、MEXT 科研費 24248060, 24404007 の助成を受けたものです。

12 利益相反なし

13

文 献

14 (1) Endo S, Kimra S, Takatsuji T, Nanasawa K, Imanaka T, Shizuma K.
15 Measurement of soil contamination by radionuclides due to the
16 Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident and associated
17 estimated cumulative external dose estimation. J Environ Radioact
18 2011;111:18-27.

19 (2) 原子力規制委員会, 放射線モニタリング情報.
20 <http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/>, 閲覧 2012 年 8 月 1 日.

21 (3) 袁軍, 世良耕一郎, 高辻俊宏. 大気中浮遊物質に含まれる放射性同位元素
22 と金属元素の関係. NMCC 共同利用研究成果報文集 2014;19(2012 年):
23 126-159. <http://www.jrias.or.jp/report/cat5/620.html>

24 (4) Yuan J, Zeng Z, Takatsuji T. Radioactivity of the aerosol collected in
25 Nagasaki City due to the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant

- 1 Accident. Proceedings of the 17th Hiroshima International Symposium -
2 Lessons from unhappy events in the history of nuclear power
3 development - January 25-26, 2012 Kojin-Kaikan, Hiroshima University
4 2012;79-86
- 5 (5) 長崎県環境部ホームページ, 降下物の放射能調査について.
6 http://www.pref.nagasaki.jp/kankyodept/infodetail.php?info_no=1034,
7 2012年5月16日閲覧
- 8 (6) 世良耕一郎. Bio-PIXE その理論と応用 第3章 生物試料の測定・定量
9 法—測定条件と無標準定量分析法— RADIOISOTOPES 2000;49:494-504
- 10 (7) ICRP. Age-dependent doses to the members of the public from intake
11 of radionuclides - Part 5 compilation of ingestion and inhalation
12 coefficients. ICRP Publ 72 1995;Ann. ICRP 26 (1).
- 13 (8) NOAA. HYSPLIT-Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated
14 Trajectory Model, <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php> (2011)
- 15 (9) 国立環境研究所地球環境研究センター. CGER METEX,
16 <http://db.cger.nies.go.jp/metex/index.jp.html> (2012)
- 17 (10) Winifred A, Bird WA, Grossman E. Chemical Aftermath;
18 Contamination and Cleanup Following the Tohoku Earthquake and
19 Tsunami, Environ Health Perspect 2011;July 1;119(7):a290-a301
- 20 (11) 百島則幸. 植物葉に沈着した粒子状物質の滞留時間, エアロゾル研究
21 1995;10(4):271-275
- 22 (12) 高辻俊宏, 吉田正博, 高尾秀明, 大浦紀信, 琴浦和樹, 山中泰, 柳田洋
23 良, 奥村寛. 非密封 RI 施設の自動空調換気設備と排風機運転状況自動監視
24 記録システム—長崎大学アイソトープ総合センターにおける省エネ対策—.
25 Radioisotopes 1998;47:129-137

- 1 (13) 河田燕, 山田崇裕. 原子力事故により放出された放射性セシウムの
2 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比について. *Isotope News* 5月 2012;697:16-20
- 3 (14) 小森昌史, 小豆川勝見, 野川憲夫, 松尾基之. $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比を指標
4 とした福島第一原子力発電所事故に由来する放射性核種の放出原子炉別汚
5 染評価, *BUNSEKI KAGAKU* 2013;62No.6:475-483
- 6 (15) 原子力安全・保安院. 福島第一原子力発電所1～3号機の原子炉停止時
7 の放射性物質(ヨウ素131, セシウム137)の量について, 福島1F1
8 ～3号機の原子炉停止時の放射性物質の量について, 地震被害情報(第93
9 報)(4月14日15時00分現在)及び現地モニタリング情報, 経済産業省,
10 2011;
11 <http://www.meti.go.jp/press/2011/04/20110414004/20110414004.html>,
12 2014年11月18日閲覧
- 13 (16) 日本原子力研究開発機構. 東京電力福島第一原子力発電所事故により
14 環境中に放出された放射性物質の拡散シミュレーションの動画, 2011;
15 <http://nsec.jaea.go.jp/ers/environment/envs/fukushima/>, 2014年11月20
16 日閲覧
- 17
- 18 Fig.1 The place of Nagasaki University and Nagasaki Prefectural Forest
19 Park, Fukushima Daiichi nuclear power plant (The distant between
20 Nagasaki University and Fukushima Daiichi nuclear power plant is
21 1139.44km. The distant between Nagasaki University and Nagasaki
22 Prefectural Forest Park is 19.14km.)
- 23 Fig.2 Specific activity of aerosol collected at Nagasaki prefectural forest park
24 and Nagasaki University
- 25 Fig.3 Radioactivity concentration per air volume from 23 Mar 2011 to 13Feb 2013

1 Fig.4 The mass concentration of aerosol per unit volume of air from 23 Mar
2 2011 to 13 Feb 2013

3 Fig.5 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ activity ratios for samples both nuclides were detected
4 converted backward to the value of Mar 11, 2011.

5 Fig.6 Air forward trajectory from Fukushima Daiichi nuclear power plant
6 between 11 and 19 Jun 2012 (Total run time 72 hours, start 1 new
7 trajectory every 12 hours). The curves indicate trajectories that start at
8 different times. $^{134,137}\text{Cs}$ are detected in the aerosol collected between 13
9 and 20 Jun 2012 at Nagasaki University. The left is NOAA and the right
10 is METEX results.

11 Fig.7 Air forward trajectory from Fukushima Daiichi nuclear power plant
12 between 8 and 16 Oct 2012 (Total run time 72 hours, start 1 new trajectory
13 every 12 hours). The curves indicate trajectories that start at different
14 times. $^{134,137}\text{Cs}$ are detected in the aerosol collected between 10 and 17 Oct
15 2012 at Nagasaki prefectural forest park. The left is NOAA and the right
16 is METEX results.

17 Fig.8 Air forward trajectory from Fukushima Daiichi nuclear power plant
18 between 21 and 29 Jan 2013 (Total run time 72 hours, start 1 new
19 trajectory every 12 hours). The curves indicate trajectories that start at
20 different times. $^{134,137}\text{Cs}$ are detected in the aerosol collected between 23
21 and 30 Jan 2013 at Nagasaki University. The left is NOAA and the right
22 is METEX results.

23 Fig.9 Air forward trajectory from Fukushima Daiichi nuclear power plant
24 between 5 and 12 Feb 2013 (Total run time 72 hours, start 1 new trajectory
25 every 12 hours). The curves indicate trajectories that start at different

1 times. $^{134,137}\text{Cs}$ are detected in the aerosol collected between 7 and 13 Feb
2 2013 at Nagasaki prefectural forest park. The left is NOAA and the right is
3 METEX results.

4 Fig.10 Air backward trajectory from Nagasaki University between 13 and 20
5 Jun 2012 (Total run time 72 hours, start 1 new trajectory every 12 hours).
6 The curves indicate trajectories that arrive at different times. $^{134,137}\text{Cs}$
7 are detected in the aerosol collected between 13 and 20 Jun 2012 at
8 Nagasaki University. The left is NOAA and the right is METEX results.

9 Fig.11 Air backward trajectory from Nagasaki University between 23 and 30
10 Jan 2013 (Total run time 72 hours, start 1 new trajectory every 12 hours).
11 The curves indicate trajectories that arrive at different times. $^{134,137}\text{Cs}$
12 are detected in the aerosol collected between 23 and 30 Jan 2013 at
13 Nagasaki University. The left is NOAA and the right is METEX results.

14 Fig.12 Air backward trajectory from Nagasaki prefectural forest park between
15 10 and 17 Oct 2012 (Total run time 72 hours, start 1 new trajectory every
16 12 hours). The curves indicate trajectories that arrive at different times.
17 $^{134,137}\text{Cs}$ are detected in the aerosol collected between 10 and 17 Oct 2012
18 at Nagasaki prefectural forest park. The left is NOAA and the right is
19 METEX results.

20 Fig.13 Air backward trajectory from Nagasaki prefectural forest park between
21 7 and 13 Feb 2013 (Total run time 72 hours, start 1 new trajectory every
22 12 hours). The curves indicate trajectories that arrive at different times.
23 $^{134,137}\text{Cs}$ are detected in the aerosol collected between 7 and 13 Feb 2013 at
24 Nagasaki prefectural forest park. The left is NOAA and the right is METEX
25 results.

1 Fig.14 Air forward trajectory in Fukushima Daiichi nuclear power plant
2 from 04 Apr 2012 to 11 Apr 2012 (Total run time 72 hours, start 1 new
3 trajectory every 12 hours). The curves indicate trajectories that start at
4 different times. The left is NOAA and the right is METEX results.

5

6 Table .1 ^{134}Cs and ^{137}Cs detected in Nagasaki (Bq/kg)

7 Table .2 ^{134}Cs , ^{137}Cs and ^{210}Pb detected in Nagasaki (mBq/m^3) and evaluation of internal
8 exposure in each term. Effective dose coefficients of ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{210}Pb (including
9 radioactive equilibrium ^{210}Bi , ^{206}Hg and ^{206}Tl) and ^{210}Po are assumed 2.0×10^{-8} ,
10 3.9×10^{-8} , 1.2×10^{-6} and 3.3×10^{-6} Sv/Bq, respectively according to ICRP Publ.72. ^{210}Pb
11 and ^{210}Po are assumed radioactive equilibrium. Respiratory volume is assumed 22.21
12 m^3/day .

13

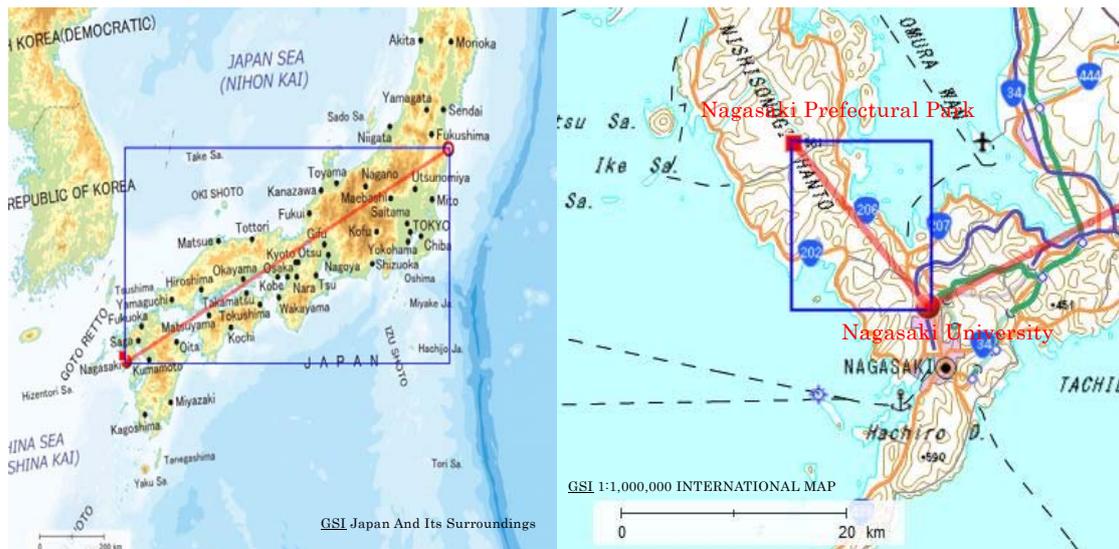


Fig.1 The place of Nagasaki University and Nagasaki Prefectural Forest Park, Fukushima Daiichi nuclear power plant (The distant between Nagasaki University and Fukushima Daiichi nuclear power plant is 1139.44km. The distant between Nagasaki University and Nagasaki Prefectural Forest Park is 19.14km.)

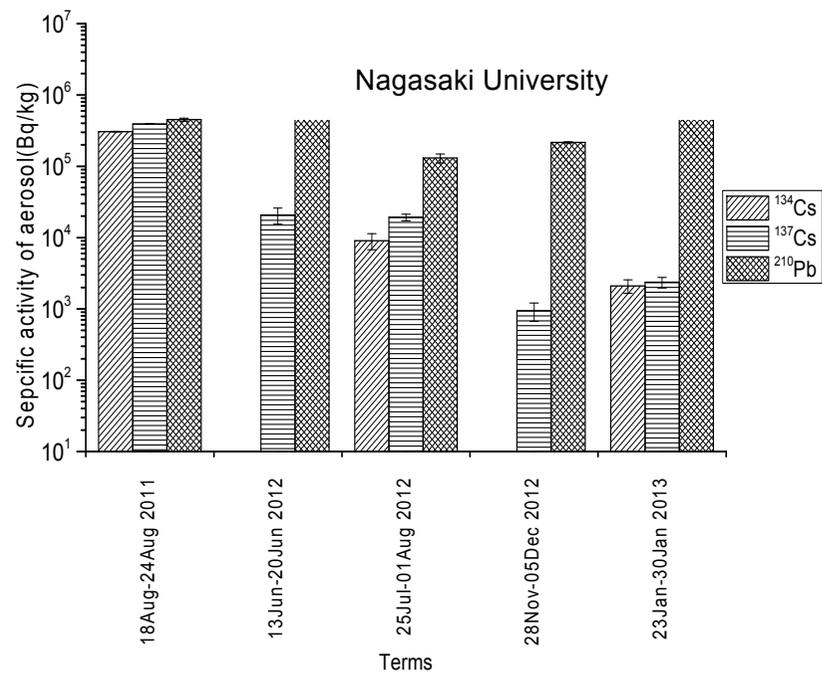
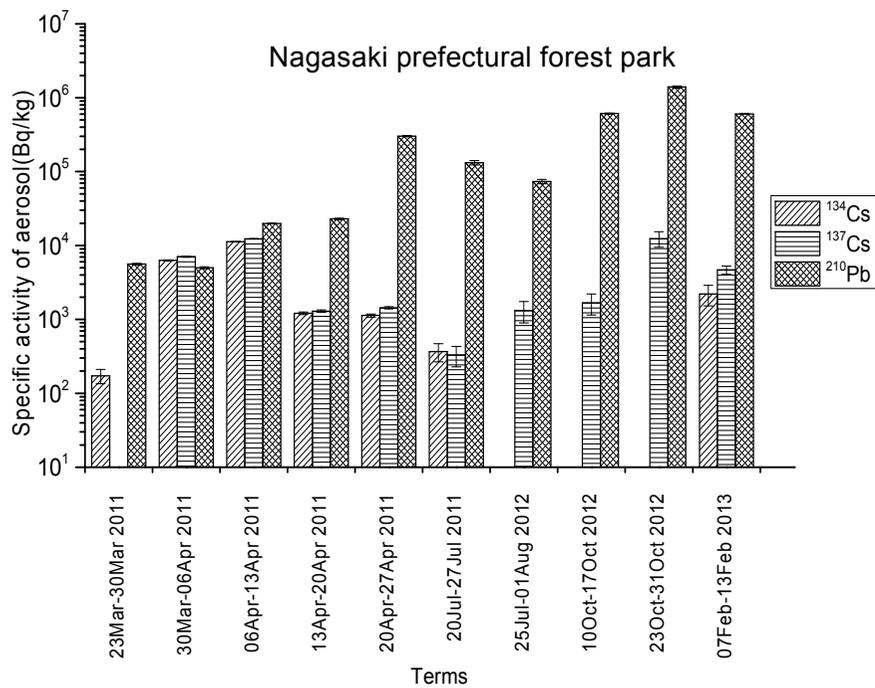


Fig.2 Specific activity of aerosol collected at Nagasaki prefectural forest park and Nagasaki University

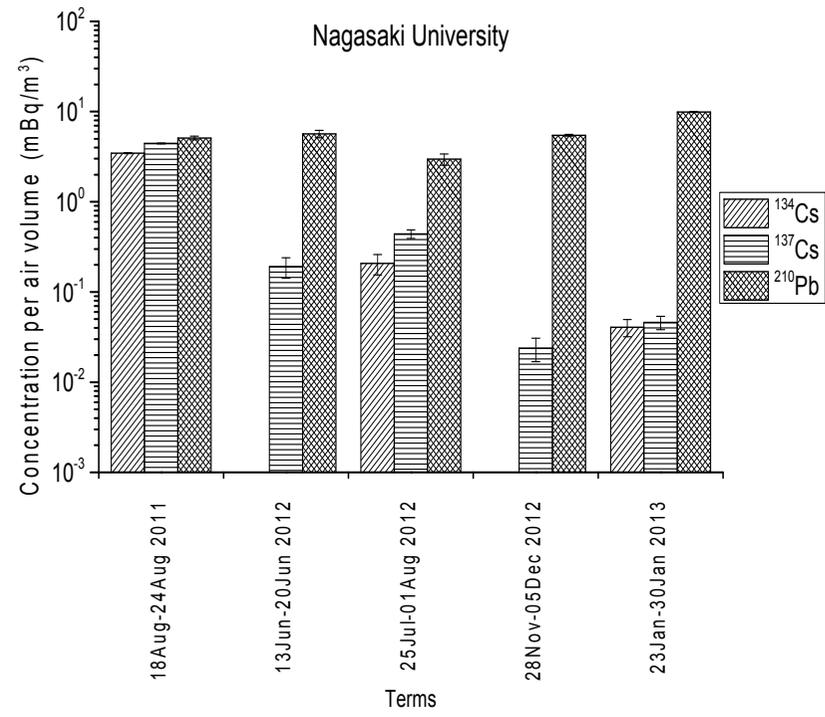
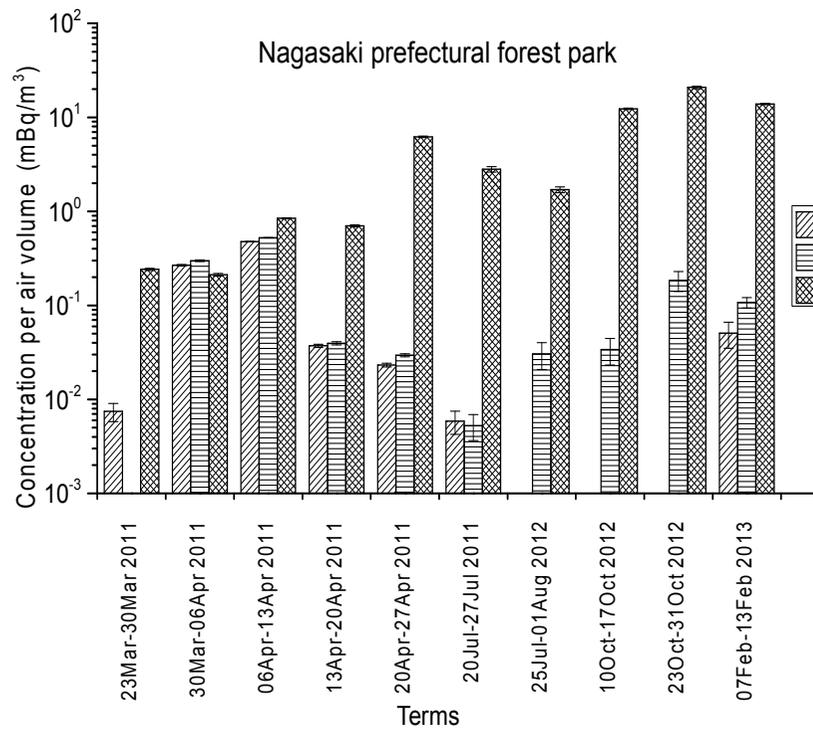


Fig.3 Radioactivity concentration per air volume from 23 Mar 2011 to 13 Feb 2013

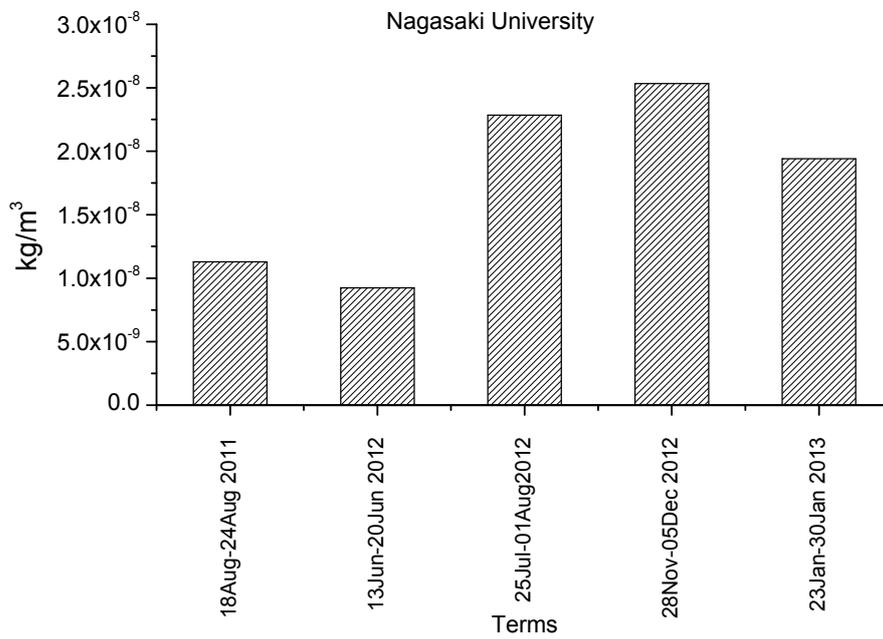
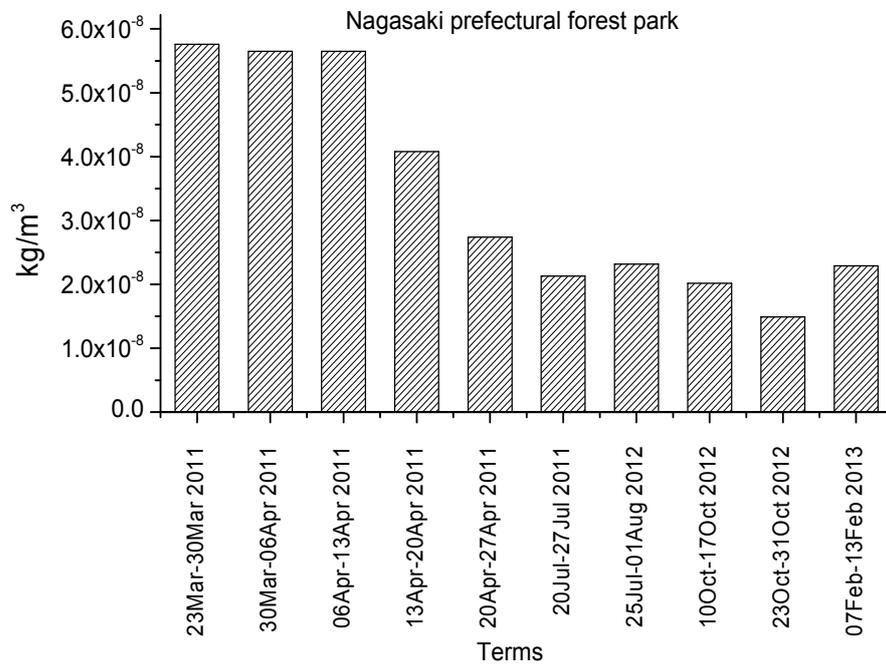


Fig.4 The mass concentration of aerosol per unit volume of air from 23 Mar 2011 to 13 Feb 2013

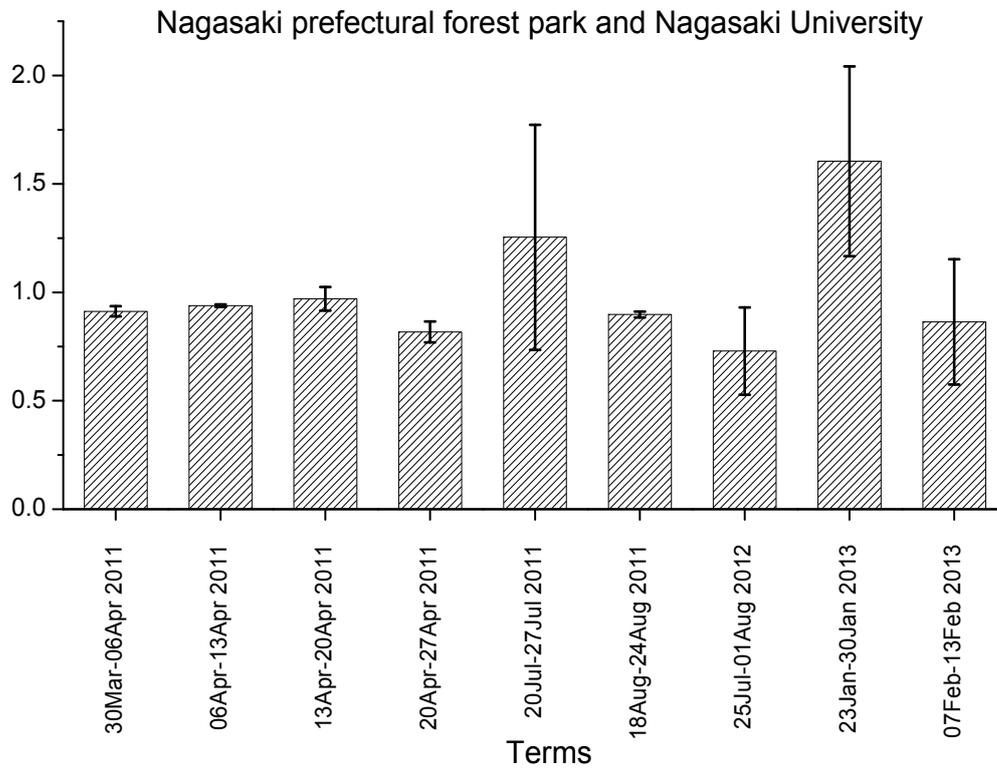


Fig.5 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ activity ratios for samples both nuclides were detected converted backward to the value of 11 Mar 2011.

NOAA HYSPLIT MODEL
 Forward trajectories starting at 0200 UTC 11 Jun 12
 GDAS Meteorological Data

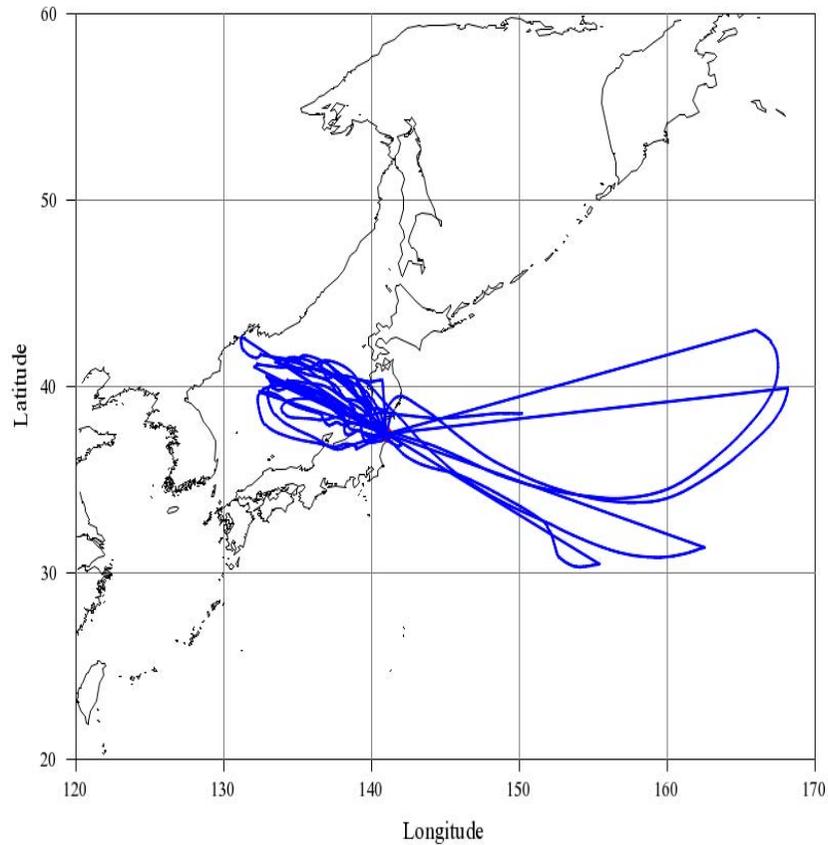
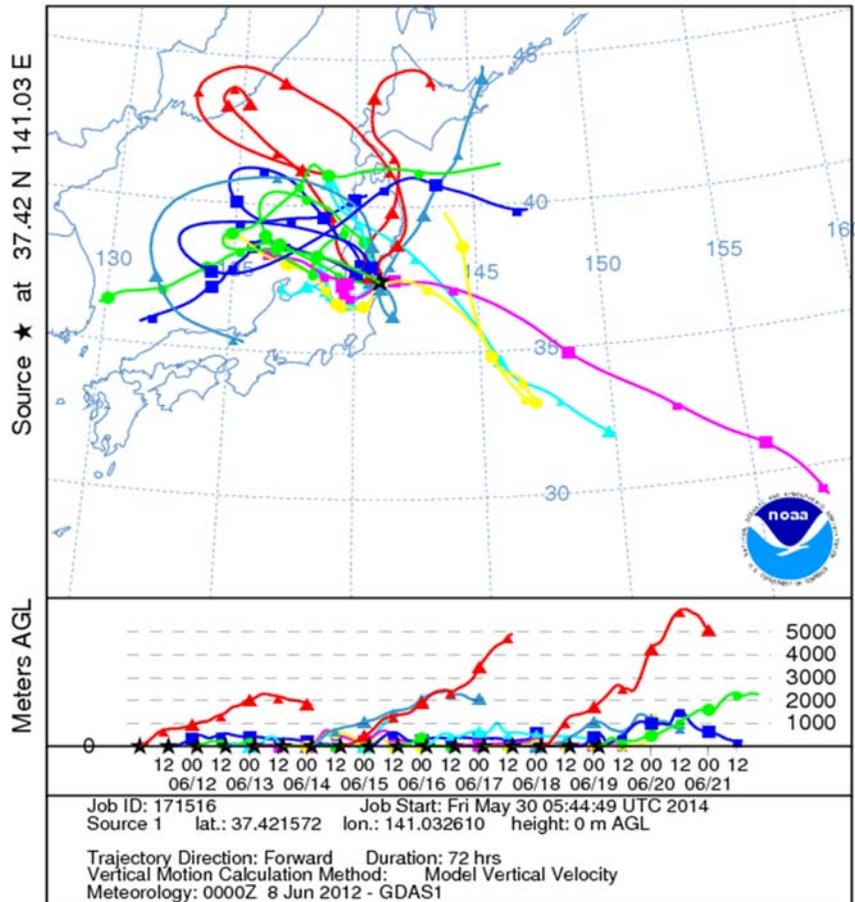


Fig.6 Air forward trajectory from Fukushima Daiichi nuclear power plant between 11 and 19 Jun 2012 (Total run time 72 hours, start 1 new trajectory every 12 hours). The curves indicate trajectories that start at different times. ^{134,137}Cs are detected in the aerosol collected between 13 and 20 Jun 2012 at Nagasaki University. The left is NOAA and the right is METEX results.

NOAA HYSPLIT MODEL
 Forward trajectories starting at 0200 UTC 08 Oct 12
 GDAS Meteorological Data

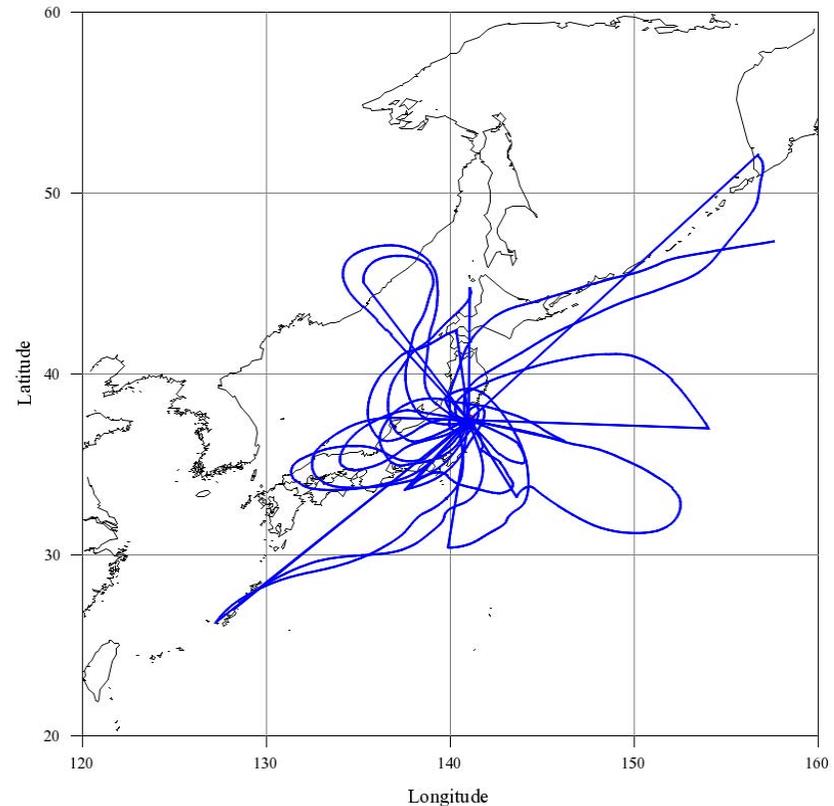
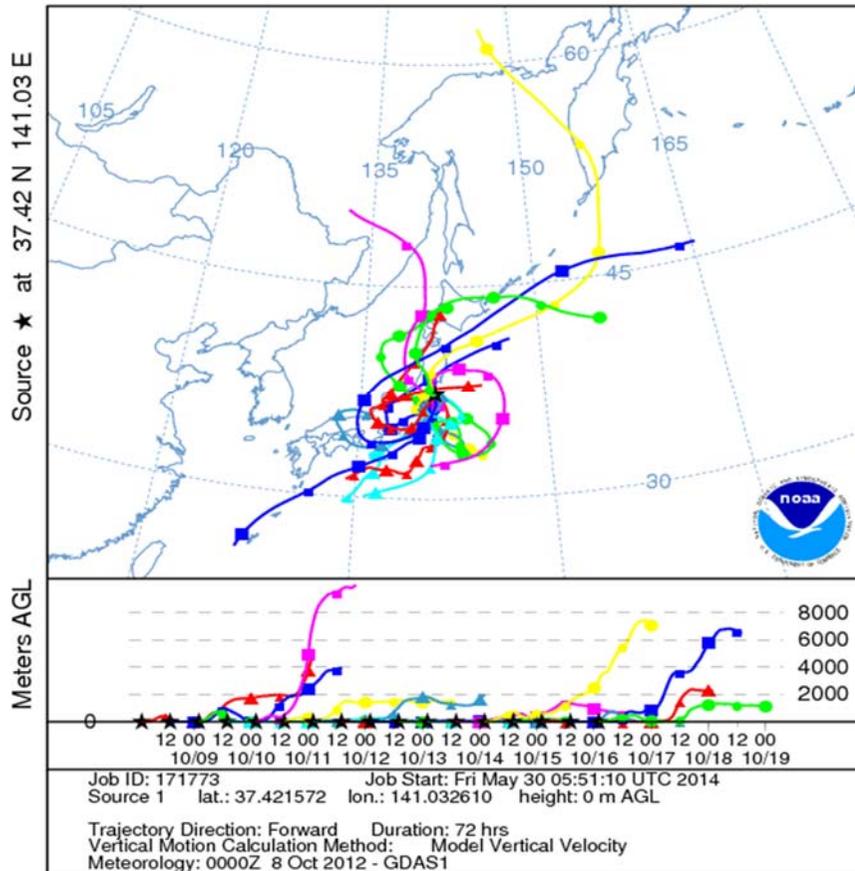


Fig.7 Air forward trajectory from Fukushima Daiichi nuclear power plant between 8 and 16 Oct 2012 (Total run time 72 hours, start 1 new trajectory every 12 hours). The curves indicate trajectories that start at different times. ^{134,137}Cs are detected in the aerosol collected between 10 and 17 Oct 2012 at Nagasaki prefectural forest park. The left is NOAA and the right is METEX results.

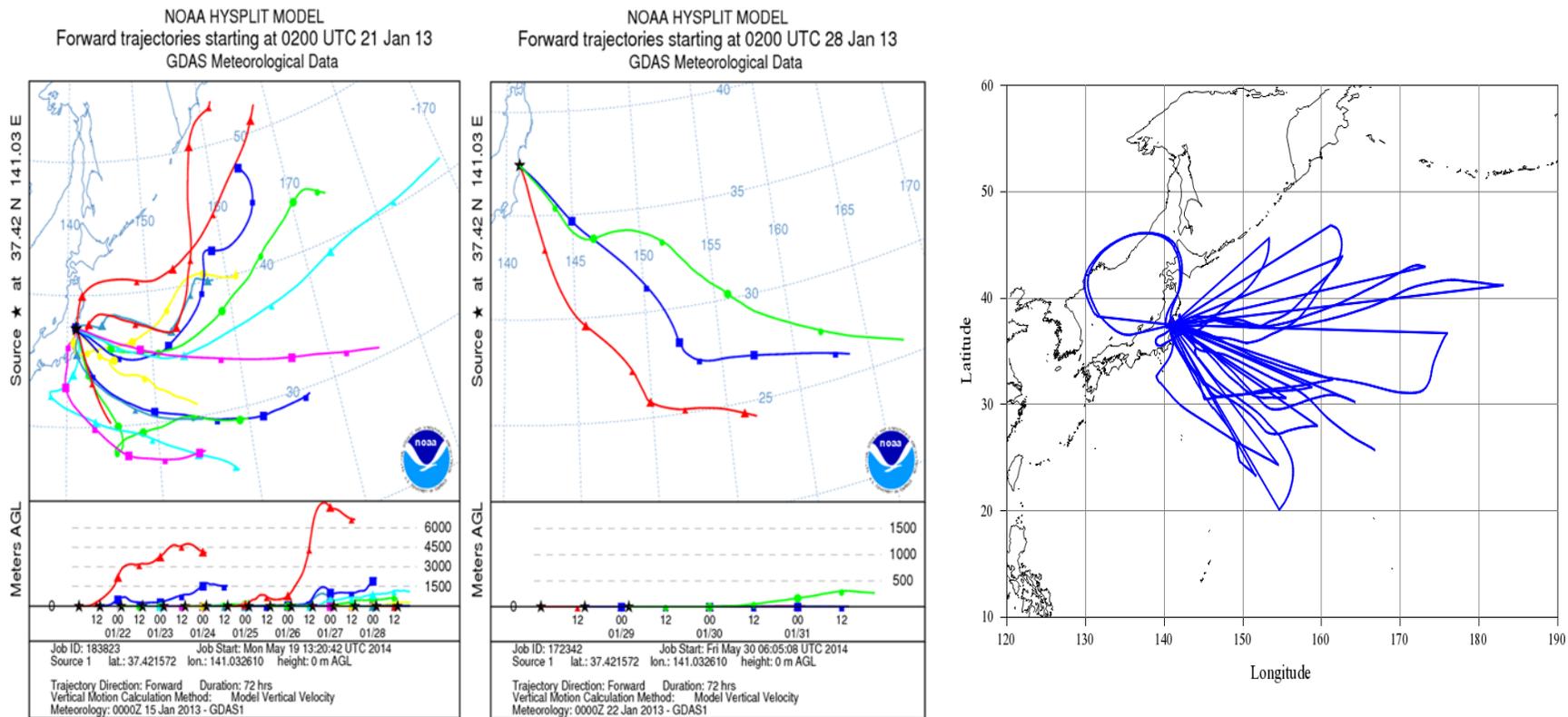


Fig.8 Air forward trajectory from Fukushima Daiichi nuclear power plant between 21 and 29 Jan 2013 (Total run time 72 hours, start 1 new trajectory every 12 hours). The curves indicate trajectories that start at different times. ^{134}Cs , ^{137}Cs are detected in the aerosol collected between 23 and 30 Jan 2013 at Nagasaki University. The left is NOAA and the right is METEX results.

NOAA HYSPLIT MODEL
 Backward trajectories ending at 0200 UTC 20 Jun 12
 GDAS Meteorological Data

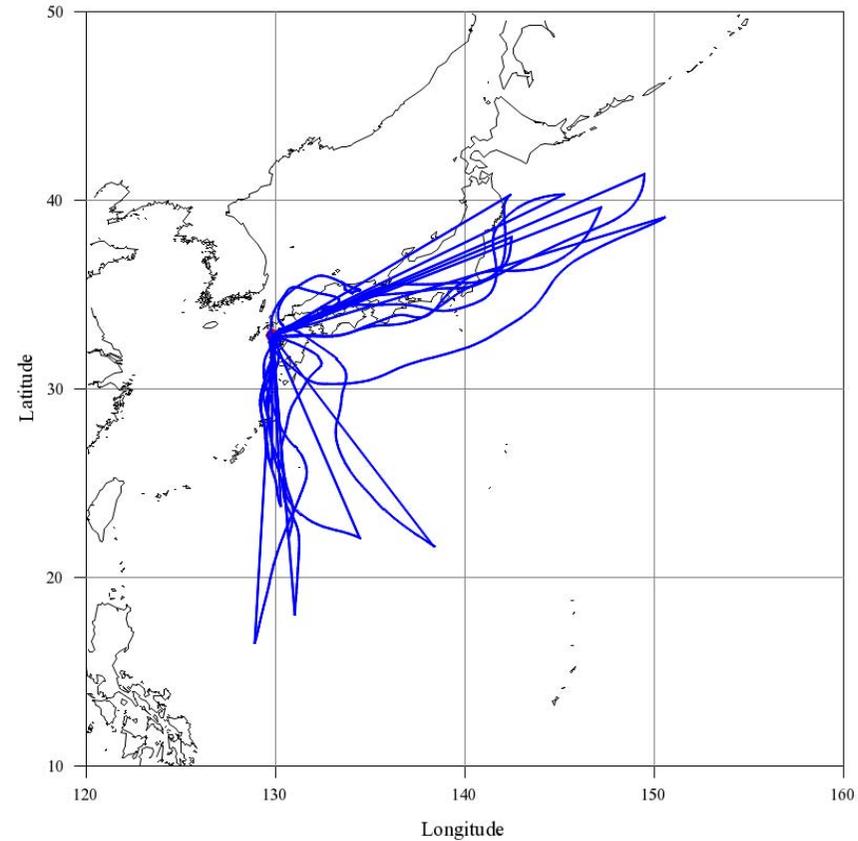
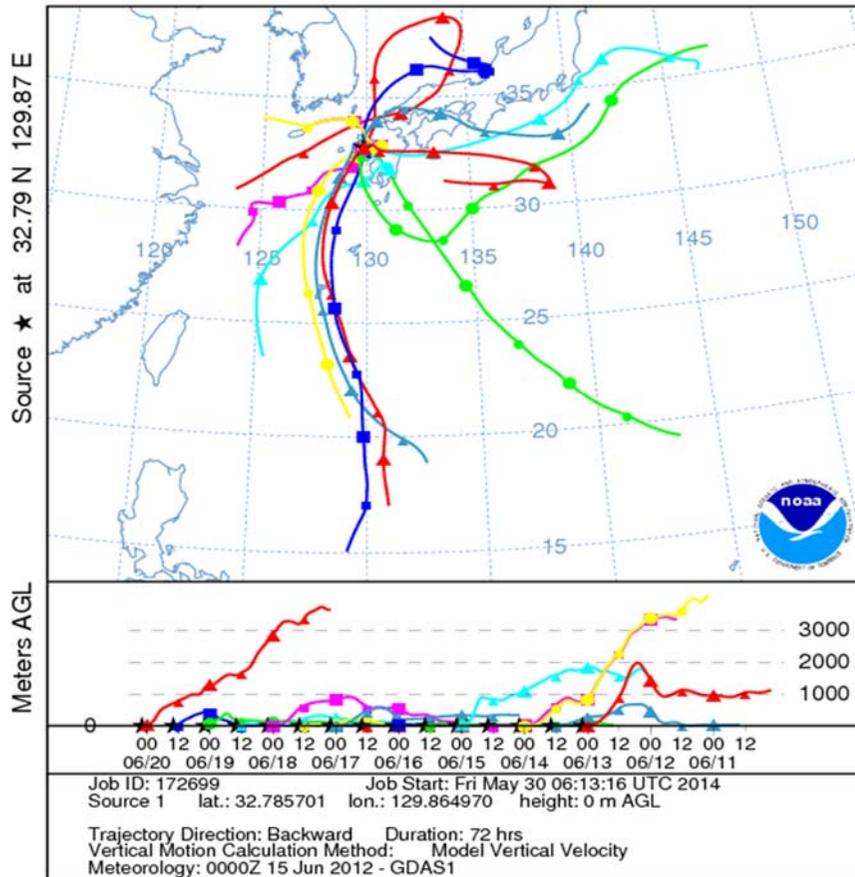


Fig.10 Air backward trajectory from Nagasaki University between 13 and 20 Jun 2012 (Total run time 72 hours, start 1 new trajectory every 12 hours). The curves indicate trajectories that arrive at different times. $^{134,137}\text{Cs}$ are detected in the aerosol collected between 13 and 20 Jun 2012 at Nagasaki University. The left is NOAA and the right is METEX results.

NOAA HYSPLIT MODEL
 Forward trajectories starting at 0200 UTC 02 Apr 12
 GDAS Meteorological Data

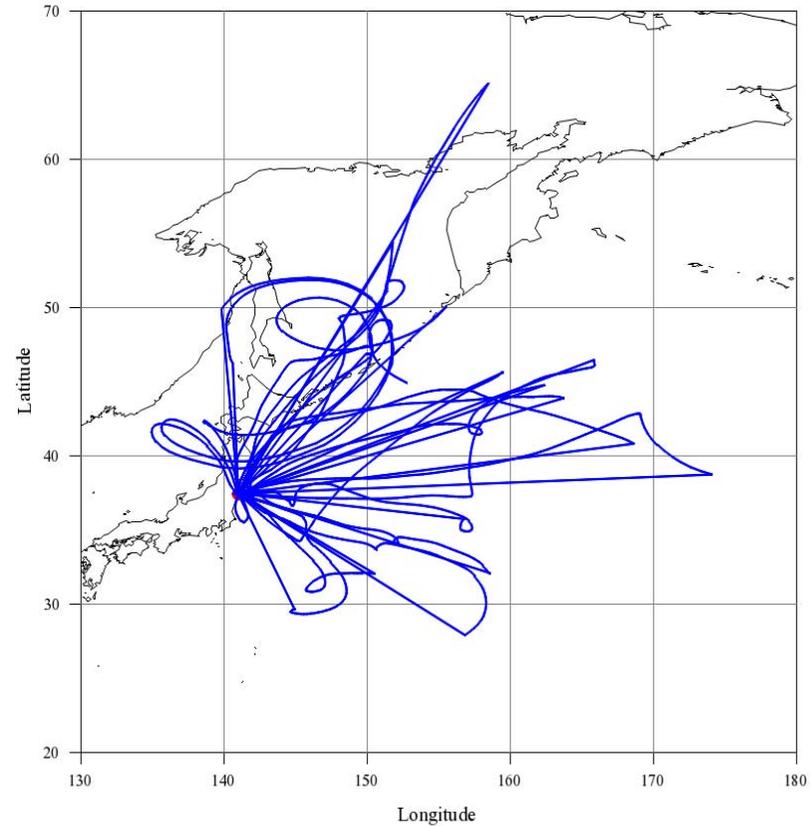
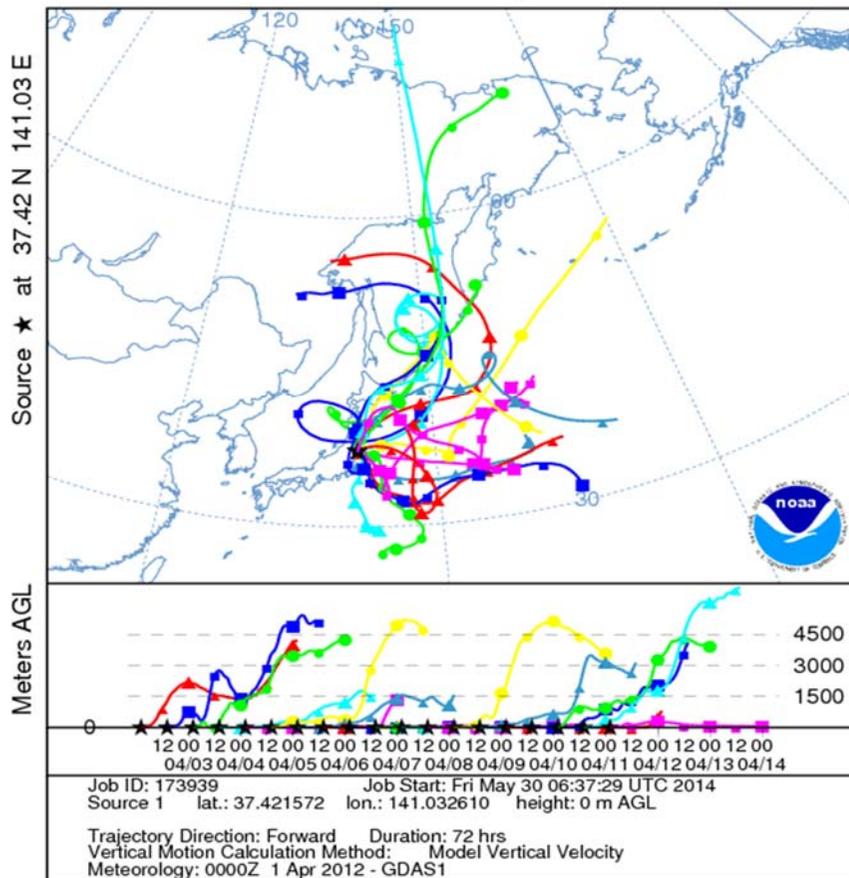


Fig.14 Air forward trajectory in Fukushima Daiichi nuclear power plant from 04 Apr 2012 to 11 Apr 2012 (Total run time 72 hours, start 1 new trajectory every 12 hours). The curves indicate trajectories that start at different times. The left is NOAA and the right is METEX results.

Table 1 ^{134}Cs and ^{137}Cs detected in Nagasaki (Bq/kg)

| Place | Week | Time to start and end | ^{134}Cs | Detection limit value of ^{134}Cs | ^{137}Cs | Detection limit value of ^{137}Cs | ^{210}Pb |
|----------------------------------|------------------|-----------------------|------------------------------|--|------------------------------|--|-----------------------------|
| Nagasaki University | 18Aug-24Aug 2011 | 11:30 | $(3.06\pm 0.03)\times 10^5$ | 0.86×10^4 | $(3.93\pm 0.04)\times 10^5$ | 1.12×10^4 | $(4.52\pm 0.22)\times 10^5$ |
| | 13Jun-20Jun 2012 | 11:30 | ND | 1.86×10^4 | $(2.07\pm 0.53)\times 10^4$ | 1.56×10^4 | $(6.13\pm 0.56)\times 10^5$ |
| | 25Jul-01Aug 2012 | 11:30 | $(9.07\pm 2.30)\times 10^3$ | 6.82×10^3 | $(1.93\pm 0.21)\times 10^4$ | 0.57×10^4 | $(1.30\pm 0.19)\times 10^5$ |
| | 28Nov-05Dec 2012 | 11:30 | ND | 9.56×10^2 | $(9.41\pm 2.73)\times 10^2$ | 8.15×10^2 | $(2.16\pm 0.05)\times 10^5$ |
| | 23Jan-30Jan 2013 | 11:30 | $(2.10\pm 0.45)\times 10^3$ | 1.33×10^3 | $(2.37\pm 0.40)\times 10^3$ | 1.28×10^3 | $(5.10\pm 0.07)\times 10^5$ |
| Nagasaki prefectural forest park | 23Mar-30Mar 2011 | 11:30 | $(1.72\pm 0.38)\times 10^2$ | 1.08×10^2 | ND | 1.36×10^2 | $(5.60\pm 0.15)\times 10^3$ |
| | 30Mar-06Apr 2011 | 11:30 | $(6.30\pm 0.12)\times 10^3$ | 3.55×10^2 | $(7.06\pm 0.13)\times 10^3$ | 0.38×10^3 | $(5.01\pm 0.16)\times 10^3$ |
| | 06Apr-13Apr 2011 | 11:30 | $(11.27\pm 0.05)\times 10^3$ | 0.14×10^3 | $(12.36\pm 0.06)\times 10^3$ | 0.17×10^3 | $(1.99\pm 0.03)\times 10^4$ |
| | 13Apr-20Apr 2011 | 11:30 | $(1.21\pm 0.05)\times 10^3$ | 1.27×10^2 | $(1.29\pm 0.05)\times 10^3$ | 0.12×10^3 | $(2.29\pm 0.06)\times 10^4$ |
| | 20Apr-27Apr 2011 | 11:30 | $(1.13\pm 0.05)\times 10^3$ | 0.12×10^3 | $(1.44\pm 0.05)\times 10^3$ | 0.11×10^3 | $(3.02\pm 0.05)\times 10^5$ |
| | 20Jul-27Jul 2011 | 11:30 | $(3.68\pm 1.02)\times 10^2$ | 3.01×10^2 | $(3.30\pm 1.02)\times 10^2$ | 3.46×10^2 | $(1.32\pm 0.05)\times 10^5$ |
| | 25Jul-01Aug 2012 | 11:30 | ND | 1.53×10^3 | $(1.32\pm 0.42)\times 10^3$ | 1.25×10^3 | $(7.34\pm 0.51)\times 10^4$ |
| | 10Oct-17Oct 2012 | 11:30 | ND | 1.93×10^3 | $(1.68\pm 0.53)\times 10^3$ | 1.59×10^3 | $(6.11\pm 0.01)\times 10^5$ |
| | 23Oct-31Oct 2012 | 11:30 | ND | 1.27×10^4 | $(1.24\pm 0.3)\times 10^4$ | 8.65×10^3 | $(1.40\pm 0.05)\times 10^6$ |
| | 07Feb-13Feb 2013 | 11:30 | $(2.21\pm 0.68)\times 10^3$ | 2.05×10^3 | $(4.69\pm 0.60)\times 10^3$ | 1.66×10^3 | $(6.05\pm 0.10)\times 10^5$ |

Table 2 ^{134}Cs , ^{137}Cs and ^{210}Pb detected in Nagasaki (mBq/m^3) and evaluation of internal exposure in each term. Effective dose coefficients of ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{210}Pb (including radioactive equilibrium ^{210}Bi , ^{206}Hg and ^{206}Tl) and ^{210}Po are assumed 2.0×10^{-8} , 3.9×10^{-8} , 1.2×10^{-6} and 3.3×10^{-6} Sv/Bq, respectively according to ICRP Publ.72. ^{210}Pb and ^{210}Po are assumed radioactive equilibrium. Respiratory volume is assumed $22.21 \text{ m}^3/\text{day}$.

| Place | Term | ^{134}Cs (mBq/m^3) | ^{137}Cs (mBq/m^3) | Committed effective dose of ^{134}Cs and ^{137}Cs (μSv) | ^{210}Pb | Committed effective dose of ^{210}Pb and ^{210}Po (μSv) |
|----------------------------------|----------------------------------|---|---|--|----------------------------------|--|
| Nagasaki University | 18Aug-24Aug 2011 | $(3.46 \pm 0.04) \times 10^0$ | $(4.44 \pm 0.05) \times 10^0$ | $(3.768 \pm 0.033) \times 10^{-2}$ | $(5.11 \pm 0.24) \times 10^0$ | 3.575 ± 0.168 |
| | 13Jun-20Jun 2012 | ND | $(1.91 \pm 0.49) \times 10^{-1}$ | $(1.16 \pm 0.30) \times 10^{-3}$ | $(5.66 \pm 0.52) \times 10^0$ | 3.96 ± 0.36 |
| | 25Jul-01Aug 2012 | $(2.07 \pm 0.53) \times 10^{-1}$ | $(4.40 \pm 0.48) \times 10^{-1}$ | $(3.31 \pm 0.33) \times 10^{-3}$ | $(2.97 \pm 0.43) \times 10^0$ | 2.08 ± 0.30 |
| | 28Nov-05Dec 2012 | ND | $(2.38 \pm 0.70) \times 10^{-2}$ | $(1.44 \pm 0.42) \times 10^{-4}$ | $(5.47 \pm 0.12) \times 10^0$ | 3.827 ± 0.084 |
| | 23Jan-30Jan 2013 | $(4.08 \pm 0.88) \times 10^{-2}$ | $(4.60 \pm 0.78) \times 10^{-2}$ | $(4.06 \pm 0.54) \times 10^{-4}$ | $(9.90 \pm 0.13) \times 10^0$ | 6.926 ± 0.091 |
| Nagasaki prefectural forest park | 23Mar-30Mar 2011 | $(7.44 \pm 1.63) \times 10^{-3}$ | ND | $(2.31 \pm 0.51) \times 10^{-5}$ | $(2.42 \pm 0.06) \times 10^{-1}$ | $(1.69 \pm 0.04) \times 10^{-1}$ |
| | 30Mar-06Apr 2011 | $(2.61 \pm 0.05) \times 10^{-1}$ | $(2.99 \pm 0.06) \times 10^{-1}$ | $(2.62 \pm 0.04) \times 10^{-3}$ | $(2.12 \pm 0.07) \times 10^{-1}$ | $(1.48 \pm 0.05) \times 10^{-1}$ |
| | 06Apr-13Apr 2011 | $(4.78 \pm 0.02) \times 10^{-1}$ | $(5.24 \pm 0.02) \times 10^{-1}$ | $(4.663 \pm 0.014) \times 10^{-3}$ | $(8.42 \pm 0.11) \times 10^{-1}$ | $(5.89 \pm 0.07) \times 10^{-1}$ |
| | 13Apr-20Apr 2011 | $(3.71 \pm 0.15) \times 10^{-2}$ | $(3.96 \pm 0.16) \times 10^{-2}$ | $(3.55 \pm 0.11) \times 10^{-4}$ | $(7.01 \pm 0.17) \times 10^{-1}$ | $(4.90 \pm 0.12) \times 10^{-1}$ |
| | 20Apr-27Apr 2011 | $(2.32 \pm 0.11) \times 10^{-2}$ | $(2.95 \pm 0.11) \times 10^{-2}$ | $(2.51 \pm 0.08) \times 10^{-4}$ | $(6.21 \pm 0.11) \times 10^0$ | 4.34 ± 0.08 |
| | 20Jul-27Jul 2011 | $(5.87 \pm 1.62) \times 10^{-3}$ | $(5.27 \pm 1.62) \times 10^{-3}$ | $(5.02 \pm 1.10) \times 10^{-5}$ | $(2.81 \pm 0.19) \times 10^0$ | 1.97 ± 0.13 |
| | 25Jul-01Aug 2012 | ND | $(3.05 \pm 0.98) \times 10^{-2}$ | $(1.85 \pm 0.59) \times 10^{-4}$ | $(1.70 \pm 0.12) \times 10^0$ | 1.19 ± 0.08 |
| | 10Oct-17Oct 2012 | ND | $(3.39 \pm 1.07) \times 10^{-2}$ | $(2.05 \pm 0.65) \times 10^{-4}$ | $(1.23 \pm 0.20) \times 10^1$ | 8.61 ± 1.40 |
| | 23Oct-31Oct 2012 | ND | $(1.85 \pm 0.44) \times 10^{-1}$ | $(1.12 \pm 0.27) \times 10^{-3}$ | $(2.08 \pm 0.70) \times 10^1$ | $(1.46 \pm 0.49) \times 10^1$ |
| 07Feb-13Feb 2013 | $(5.06 \pm 1.57) \times 10^{-2}$ | $(1.07 \pm 0.14) \times 10^{-1}$ | $(8.06 \pm 0.98) \times 10^{-4}$ | $(1.38 \pm 0.24) \times 10^1$ | 9.65 ± 1.68 | |