

ビキニ環礁水爆実験による
元被保険者の被ばく線量評価に関する報告書

平成 29 年 12 月

全国健康保険協会船員保険部

当協会では船員保険を運営しており、その中で平成 21 年以前に発生した職務上の災害に係る給付を行っています。

昭和 29 年（1954 年）、米国は太平洋ビキニ環礁において一連の水爆実験を実施しました。

その当時、この海域で操業し、水爆実験で放射線に被ばくし、それにより疾病を患い又は死亡したとして、当時の漁船員及びその遺族から船員保険による職務上給付を求める申請がありました。

当協会において職務上給付の決定を行うに当たっては、職務遂行性及び職務起因性を判断する必要があります。

しかしながら今回の申請は水爆実験で被ばくしたとの案件であり、当協会では放射線等に関する知見が乏しいことから、放射線や医学等に関する専門的知見を有する有識者をお願いして「船員保険における放射線等に関する有識者会議」を開催し、水爆実験による元漁船員の被ばく線量の評価等について検討を行っていただきました。

本報告書は当協会が給付決定を行うに当たり審査の参考とするために、作成したものです。

本報告書に関する問合せにつきましては、全国健康保険協会船員保険部までお願いします。

本報告書は当協会船員保険部のホームページより入手することができます。

本報告書に関する著作権は当協会に帰属します。

無断複写・複製・転載などを禁じます。

(問合せ先)

全国健康保険協会船員保険部

〒102-8016

東京都千代田区富士見 2-7-2

ステージビルディング 14 階

電話 03-6862-3060

<http://www.kyoukaikenpo.or.jp/senpo>

目次

I.	総括	1
II.	第13光栄丸船員の赤血球数と血色素値からの放射線影響評価	11
III.	外部被ばくによる線量の評価	19
IV.	内部被ばくによる線量の推計	89
V.	米国のビキニ水爆実験により放射線被ばくをしたという漁船員の線量評価に関するコメント	99

I. 総括

総括報告書

ビキニ環礁水爆実験による元被保険者の被ばく線量の評価

代表者 明石 真言（量子科学技術研究開発機構 執行役）
栗原 治（量子科学技術研究開発機構
放射線医学総合研究所 部長）
辻村 憲雄（量子科学技術研究開発機構 客員研究員
日本原子力研究開発機構 主任研究員）
中村 典（放射線影響研究所 顧問）

要 旨

昭和29年3月1日から5月14日までの間、マーシャル諸島のビキニ環礁で計6回の水爆実験が行われた。当該水爆実験後にこの海域で操業もしくは通過したとされる漁船（第13 光栄丸、第7 大丸、第11 高知丸、第2 幸成丸、第5 海福丸、第5 明賀丸、第8 順光丸及び第1 月山丸）について、乗組員の放射線被ばくによる線量を評価した。個々人の被ばく線量の評価については、それぞれの船舶上での行動様式を考慮する必要があるため、船舶毎に一定の条件の下に評価を行った。これは、ビキニ水爆実験が60年以上前に行われたものであること、また当時の記録・資料、文献などは限定されているためである。請求者から提出された血液検査データを分析した結果、白血球数及び赤血球数、また血色素の値からは明らかな放射線による影響を認める所見は確認することはできなかった。一方、米軍及びその関係機関によって行われた放射線モニタリング結果と厚生労働省が開示した資料にあった船舶毎の航路を基に、ブラボーを含め各実験における対流圏及び局地放射性降下物についてのセシウム(^{137}Cs) 沈着密度及び線量率分布図を作成し、漁船の航路に重ね合わせることで、外部被ばくによる線量を評価した。外部被ばく実効線量は、最大で2.20 mSv（ミリシーベルト）であった。また海水による入浴から生じる線量は、一日当たり20分の入浴と考えると0.2 μSv であった。内部被ばく線量は、放射性降下物の吸入摂取と汚染魚の経口摂取から推定した。吸入摂取による内部被ばく線量は、吸入があったという前提にたち ^{137}Cs 沈着密度及び速度から、また経口摂取による線量は、漁獲物の汚染検査の記録から線量を評価した。吸入摂取及び経口摂取による乗組員の内部被ばく線量(預託実効線量) は、最大で各々0.14 mSv と 0.03 mSv であった。さらに提出された資料中の、歯エナメル質に記録された CO_2^- ラジカル量の電子スピン共鳴 (ESR) による測定及び末梢血リンパ球による染色体異常の頻度による線量評価に関して分析・検討したが、放射性降下物による被ばくを確認することはできなかった。これらの分析結果から、放射線による健康影響が現れる程度の被ばくがあったことを示す結果は確認できなかった。

A. 目的

昭和 29 年 3 月 1 日から 5 月 14 日までの間、マーシャル諸島のビキニ環礁で計 6 回の水爆実験が行われた。この報告書は、上記に述べた水爆実験によって被ばくしたことが疾病発症又は死亡の原因であるとする船員保険の給付申請を審査するにあたって、申請の原因とされた疾病等と水爆実験による放射線被ばくとの因果関係等を適正に評価するため、被ばく線量を推定することを目的とした。

B. 評価方法

厚労省研究で収集した米国エネルギー省科学技術局 (OSTI) 及び国防総省国防技術情報センター (DTIC) 等の文献を中心に、ビキニ水爆実験後に実施された現地のモニタリングのデータを活用し、1 回目の水爆実験 (ブラボー実験) を含め、6 回の実験に関して放射性降下物の分布図を作成し、線量を評価した。各個人の線量を推定するためには、詳細な行動記録が必要であるため、船舶毎に一定の条件の下で、外部被ばく及び内部被ばくによる線量評価を行った。線量評価に必要なパラメータは限られており、この報告書では最も科学的に合理的と考えられるものを使用した。さらに内部被ばくに関しては、基本的に放射性物質の吸入が起きた、また汚染した魚を食したという仮定で評価を行った。同時に関連した資料や論文を収集、また請求者から提出された資料に関して分析等を行い、線量評価の可能性について検討した。

① 赤血球数と血色素値からの放射線影響評価

請求者からは「第 13 光栄丸の船員 24 名

の貧血について」(第 13 光栄丸船員) が提出されている。酸素を運搬する血色素をもつ赤血球、血液凝固に関係する血小板、感染症や免疫に関係する白血球は、それぞれ放射線に対する抵抗性が異なるため、放射線被ばく後、それぞれの細胞数の減少曲線が異なる。米国保健福祉省が、「被ばく医療処置」の中で公開している「放射線による血球数への影響」<https://www.remm.nlm.gov/> (2016 年 1 月 13 日更新) を参考に、被ばく後それぞれの細胞の減少曲線を比較することで放射線による線量の推定の可能性を検討した。

② 外部被ばくによる線量

核実験当時の気象情報・放射線モニタリング情報並びに近年になってマーシャル諸島住民に対してなされた被ばく評価結果等を参考に、それぞれの船舶については放射性降下物の沈着密度と到着時刻 (TOA) を推定し、それに沈着密度と到着時刻における全核種による寄与を含む被ばく線量率の換算係数を適用することによって外部被ばくによる線量を求めた。即ちマーシャル諸島に沈着した ^{137}Cs 沈着密度分布図をそれぞれ作成し、それに基づく空間線量率分布図と、漁船の航路の重ね合わせから外部被ばくによる線量を評価した。なお、評価にあたっては、建造物、船室等による遮へいの影響は考慮せず、船舶の甲板面積は無量大とし、放射性降下物が一様に広がった無限大の甲板上に乗組員が一日当たり 24 時間立ち続け、かつ放射性壊変によるもの以外 (例えば風化作用による) の放射性物質の減少が全くないという条件で評価した。

放射性降下物については、比較的大きな粒子からなり、爆発地点近くに概ね 24 時間

以内に降下する局地放射性降下物と、比較的小さな粒子からなり対流圏内の気流ののってより遠方まで運ばれ、核爆発地点と同じ緯度帯に主に広がり、降雨等によって地表に沈降するとされる対流圏放射性降下物を対象とした。局地放射性降下物については、ビキニ環礁の東側海域で観測されており、ブラボー実験以外の実験で影響を受けたと考えられる船が見当たらなかった。対流圏放射性降下物についてはブラボー、ロメオ、クーン、ユニオン及びヤンキー実験での被ばくを考慮した。放射性降下物に遭遇したと推定される位置と時刻は、降下物の TOA が一致する時間とした。

放射性降下物によって汚染した海水を使用して入浴した場合の線量は、海水浴を仮定して評価した。海水に着水した放射性降下物は、沈降深さ 100 m までは、沈降速度 (2.3 m/時) × 着水後の経過時間、また沈降深さが 100 m を超える場合は 100 m とした。水が遮へいとして機能するため、水中での実効線量率は陸上での照射線量率に比べて小さくなる。今回は、ブラボー実験の際に汚染海域の中央を通過した第 11 高知丸を代表例として計算した。海水浴又は海水の採取時刻を現地時間で 18:00 (日本時間で 15:00) と仮定し、日々の入浴による実効線量を計算した。

③ 内部被ばくによる線量

第五福竜丸以外の船員の内部被ばく線量については、内部被ばく線量の評価に参考となる当時の検査データが存在していない。汚染したマグロの経口摂取に関して、原因となった放射性核種について、核実験当時観測された魚肉等の放射能濃度に基づき、核種の組成内訳(核分裂生成物・放射化生成

物)を検討し、61 核種による汚染したマグロ類を経口摂取として推定した。当時の分析結果から ^{65}Zn の他、 ^{54}Mn , ^{55}Fe , ^{59}Fe , ^{89}Sr , ^{90}Sr , $^{113\text{m}}\text{Cd}$, $^{115\text{m}}\text{Cd}$, ^{140}Ba , ^{140}La が検出されているが、検出された放射性核種の大半が ^{65}Zn であり、Sr 以外の核種については 1954 年時点では極めて微量と考えられ、 ^{65}Zn , ^{90}Sr , ^{89}Sr の 3 核種のみが内部被ばく線量に寄与したと仮定した。

吸入摂取に関しては、吸入摂取が起きたという前提にたち、UCRL-53505 に示された 61 核種の沈着密度と TOA に、適切な摂取モデルを組み合わせることによって、吸入による内部被ばく線量を評価した。各核種の実効線量係数は空気力学的放射能径 $1\mu\text{m}$ 及び呼吸器官から血中への吸収タイプは、基本的にタイプ M とし、ヨウ素などの一部の核種についてはタイプ F とした。対象となる漁船が放射性降下物に遭遇する時刻とその位置については、外部被ばく線量の評価(「Ⅲ. 外部被ばくによる線量の評価」を参照)で評価された結果を用いた。

沈着速度については、WHO 福島報告書と同様、全核種に対して 0.07 (m/秒)を用いた。すなわち、湿性沈着(雨、霧や雪など大気中にさまざまな形で存在する水分を媒体にして降下沈着すること)であると仮定した。

④ 資料や文献からの線量推定の可能性

検討をした資料及び論文は次の通り。

- 1) 星 正治「放射線の被曝とマグロ漁船員の歯による被曝線量評価」
- 2) 豊田 新氏「ビキニ水爆実験による日本人漁船員の ESR 被曝線量測定」
- 3) Tanaka K, Ohtaki M, Hoshi M, Chromosome aberrations in Japanese fishermen exposed to fallout radiation

420-1200 km distant from nuclear explosion test site at Bikini atoll: Report 60 years after the incident. Radiat Environ Biophys 55:329-37, 2016

歯エナメル ESR 法からの線量評価は、歯のエナメル質に記録されている CO₂-ラジカルを測定することによる。CO₂-ラジカルの信号強度は、放射線量の増加と共に直線的に増加するが、線量測定には大白歯しか適しておらず大白歯以外の歯は、被ばくとは関係のない信号が強く表れる等の欠点もある。リンパ球における染色体異常測定による線量評価は、被ばく後早期の場合は、観察の容易な不安定型染色体異常（2 動原体、ring）を観察するが、不安定型染色体異常は細胞分裂に障害があるので数年の半減期で消失するため、被ばく後長期間（10 年以上）を経た場合には、観察の難しい安定型染色体異常を測定する。安定型染色体異常（転座、逆位）の自然頻度は 10⁻²（100 個の細胞に数個）レベルであり、どちらの異常も自然頻度は年齢と共に増加する。60 歳を超えると転座（安定型異常の代表）の自然頻度は 2%以上に上昇する（個人差も大きい）ため、60 歳以上の人の低線量被ばくの線量評価は、自然頻度の個人差が大きく困難を伴う。

以上のことを考慮し上記資料及び論文について、当該水爆実験後にこの海域で操業もしくは通過したとされる漁船の線量評価につながるか否かを検討した。

C. 結果

- (1) 請求者から提出された資料による血液検査データ等の分析
今回提出されたのは第 13 光栄丸船員 24

名の船員の赤血球数、血色素量、白血球数である。第 13 光栄丸は、1954 年 3 月 1 日のブラボー実験時に、ビキニ環礁の東方約 1,200 km の位置に滞在したとされる。検査が行われた同年 3 月 30 日、4 月 7 日、5 月 4 日は、それぞれ 29 日、37 日、61 日後に相当する。

白血球数は、正常値が 4,000/mm³ から 8,000/mm³ とされており、3 月 30 日の採血では、平均値 6,881/mm³、最低値が 4,000/mm³、最高値が 11,000/mm³、4 月 7 日採血では平均値 6,700/mm³、最低値が 4,400/mm³、最高値が 9,200/mm³ であり、正常値の下限以下の船員はなく、2 回の採血で急激な変化は観察されない。一方、赤血球数と血色素量が正常より低い船員がいたが、被ばく約 1 ヶ月後に放射線により赤血球数と血色素量に影響が観察されるとすれば、少なくとも 1,000 mSv 以上の被ばくが必要であり、必ず白血球数の減少が観察される。しかしながら、2 回の検査からは、白血球数の減少は認められていない。提出された資料から、放射線被ばくの有無を推定することは困難である。

(2) 物理学的線量評価について

1. 外部被ばく線量

評価された最大の線量は、各実験別では、ブラボー実験：282 mR（第 11 高知丸）、ロメオ実験：43 mR（第 2 幸成丸）、クーン実験：26 mR（第 5 明賀丸）、ユニオン実験：2 mR（第 8 順光丸）、ヤンキー実験：6 mR（第 8 順光丸）であった。

漁船毎では、ブラボー実験とロメオ実験による線量の合計で、第 11 高知丸の 307 (= 282 + 25) mR が最大であった。この値は、

放射性降下物からの γ 線の平均エネルギー 0.7 MeV に対する ICRP Publ. 74 の回転ジオメトリにおける空気カーマ-実効線量換算係数 0.817(Sv/Gy) を用いると

$0.307 (R) \times 8.76(mGy/R) \times 0.817 (Sv/Gy) = 2.20 mSv$ となる。

入浴による線量評価では、ブラボー実験

の際に汚染海域の中央を通過した第 11 高知丸を例に、一日当たり 20 分の入浴で、実効線量は合計 0.2 μ Sv となった。陸上での照射線量率と、水中での実効線量率を比較すると水が遮へいとして機能するため、水中での実効線量率は陸上での照射線量率に比べて小さくなるためである。

表 1 外部被ばくによる線量の評価結果

船名	核実験	線量 mR	線量 mSv
第 13 光栄丸	ブラボー	118	0.84
第 7 大丸	ブラボー	71	0.51
第 11 高知丸	ブラボー	282	2.02
	ロメオ	25	0.18
	合計	307	2.20
第 2 幸成丸	ブラボー	6	0.04
	ロメオ	43	0.31
	合計	49	0.35
第 5 海福丸 ^{注1}	—	—	—
第 5 明賀丸	ロメオ	23	0.16
	クーン	26	0.19
	合計	49	0.35
第 8 順光丸	クーン	20	0.14
	ユニオン	2	0.01
	ヤンキー	6	0.04
	合計	28	0.19
第 1 月山丸 ^{注2}	—	—	—

注¹ ロメオ実験の爆発時刻にビキニ環礁の東約 870 km を北西に移動中であり、タオンギ環礁（北緯 15 度，東経 169 度）近くを爆発の約 36 時間後に通過したが、この環礁への放射性降下物の到着は約 60 時間後であるため、放射性降下物に遭遇することなくこの海域を抜け出たと考えられる。

注² 当該海域で操業を行った期間が昭和 29 年 5 月以降であり、外部被ばくはなかったとした。

なお各漁船の最大線量率は次の通り。

表 2 外部被ばくによる実効線量率

船名	線量率 mR/時	実効線量率 mSv/時
第 13 光栄丸	0.89	0.006
第 7 大丸	0.48	0.003
第 11 高知丸	2.9	0.021
第 2 幸成丸	0.28	0.002
第 5 海福丸	—	—
第 5 明賀丸	0.29	0.002
第 8 順光丸	0.11	0.001
第 1 月山丸	—	-

2. 内部被ばく線量

経口摂取は、通常の可食部となる筋肉を、操業開始から帰港までの間、毎日 300 g 食したと仮定して線量を評価した。

表 3 経口摂取による実効線量^注

船舶名	実効線量 mSv
第 13 光栄丸	0.03
第 7 大丸	0.01
第 11 高知丸	0.02
第 2 幸成丸	0.005
第 5 海福丸	0.03
第 5 明賀丸	0.01
第 8 順光丸	0.03
第 1 月山丸	0.02

^注表中の第 1 月山丸は、帰港時の漁獲物の汚染検査の記録が残されていたため、経口摂取による実効線量（内部被ばく）を評価した。

吸入被ばくに関しては対象となる漁船が放射性降下物に遭遇する時刻とその位置については、外部被ばく線量結果を用いた。

表 4 吸入摂取による実効線量

船舶名	実効線量 mSv
第 13 光栄丸	0.05
第 7 大丸	0.03
第 11 高知丸	0.14
第 2 幸成丸	0.02
第 5 海福丸 ^{注1}	—
第 5 明賀丸	0.02
第 8 順光丸	0.01
第 1 月山丸 ^{注2}	—

^{注1}放射性降下物の到着前に、当該海域を抜けたため、放射性降下物には遭遇しなかったと推定。

^{注2}当該海域で操業を行った期間が昭和 29 年 5 月以降であり、汚染魚の経口摂取による内部被ばく線量についてのみ評価。

(3) 資料や文献からの線量推定の可能性の検討について

星氏及び豊田氏の資料で、ESR で解析された歯牙は、臼歯もしくは犬歯とされているが、ESR による線量評価は、大臼歯以外では正確な被ばく線量を反映せず、測定結果を放射線被ばくによるとは結論できない。さらに、「臼歯」と記載されている結果に関しても、一例では測定結果が外側（頬側）と内側（舌側）共に 100 mGy 程度であり過度

の被ばくには該当しない。他の一例では内外で大きな差が認められた（頬側が舌側よりも 200m Gy も高い）が、もし小臼歯であれば放射線被ばくでなくても起こりうる。もし大臼歯であったとしても、放射性降下物ガンマ線の平均エネルギー（0.7 MeV）との整合性が取れず、放射性降下物による被ばくであることは考えられない。

さらに Tanaka K 等による論文 Radiat Environ Biophys. 55:329-37, 2016 の染色体異常の頻度からの線量推定結果 100 mGy は、検量線に原爆被爆者のデータから得られた

ものを使用しており、急性被ばくのデータを使用したことになる。水爆実験の放射性降下物による被ばくは、急性被ばくではなく慢性被ばくであり、航海中に一定量の放射線に被ばくしたという条件の検量線で評価すべきである。

(4) 物理学的線量評価結果

表 5 に、線量評価結果を示す。外部被ばく並びに内部被ばく線量の総線量は、最大でも 2.36 mSv と評価された。

表 5 各漁船の実効線量(mSv) 注

船舶名	外部	(吸入)	(経口)	総線量
第 13 光栄丸	0.84	0.05	0.03	0.92
第 7 大丸	0.51	0.03	0.01	0.55
第 11 高知丸	2.20	0.14	0.02	2.36
第 2 幸成丸	0.35	0.02	0.005	0.375
第 5 海福丸	—	—	0.03	0.03
第 5 明賀丸	0.35	0.02	0.01	0.38
第 8 順光丸	0.19	0.01	0.03	0.23
第 1 月山丸	—	—	0.02	0.02

注第 5 海福丸と第 1 月山丸は放射性降下物に遭遇しないため、評価値はない。

D. 考察

本報告書の目的は水爆実験によって被ばくしたことが疾病発症又は死亡の原因であるとする船員保険の給付申請を審査するにあたり、申請の原因とされた疾病等と水爆実験による放射線被ばくとの因果関係等を適正に評価するため、被ばく線量を推定することが目的である。

昭和 29 年 3 月 1 日から 5 月 14 日までの間、6 回の水爆実験が行われているが、ブラボー実験における外部被ばくに関する線量分析については、第五福竜丸を除けばビ

キニ環礁の東側海域に広がる高レベルの放射性降下物の分布域、特に爆発後 24 時間以内に滞在していた船舶がないことは、平成 26 及び 27 年度の厚労省の研究で示した通りである。今回、外部被ばくと吸入摂取による内部被ばくは、¹³⁷Cs 沈着密度を基本に、ビキニ環礁から距離約 1,600~3,000 km の代表的な島について評価された線量と一致するように評価した。一方、局所的な天候の変化等による変動が生じる可能性はあるが、現時点でそれを推測するに足る観測データに乏しい。この様に実験から 60 年以上

経た現在に残されたデータの量と質には限界があり、今回の線量評価では、データの無いパラメータについてはある仮定に基づき計算を行わざるを得なかった。例えば船の甲板の面積を無限大としたこと、船員は24時間船外に滞在し続けたと仮定し、線量率を積分する際に、放射性壊変を除く損失も建屋による遮へいも考えておらず、風化作用を無視している等がある。また吸入による内部被ばく線量評価について、世界保健機関(WHO)が福島原発事故に被災した住民の線量推計に用いた方法と基本的に同じもので行っている。しかしながら、各船が放射性降下物に遭遇した位置は、少なくとも実験場所から数百 km は離れており、小径である対流圏放射性降下物(粒子)が降下する可能性は小さいが、降雨などにより降下したと仮定している。また径が大きい粒子は鼻腔や咽頭より深く気道に入る可能性は小さく、実際は吸入による被ばくが占める割合は小さい。また Simon 等による米国の住民の線量評価では、吸入の可能性はほとんど無いとしているが、今回は明らかに放射性降下物に遭遇していない船舶を除いて、吸入の可能性については議論せずに、吸入したという前提に立ち、ばく露時間など影響を考慮せず、瞬時に全量を摂取したと仮定している。

経口摂取は、マグロ類を食したとして計算しており、魚表面の汚染と魚肉の汚染の関係で言えば、実験直後は魚の表面とエラなどに汚染が限定するが、食べた魚肉の汚染は、魚表面の測定結果から求めているため、実際よりは高いと考えられる。

収集した資料では、第5明賀丸の乗組員の一人の歯の ESR 測定から推定被ばく線量を 300 mSv としている。しかし、資料中

で行われた線量評価法により得られた結果は、放射性降下物からの被ばくを確認することが出来なかった。仮にこの船の線量が 300 mSv と仮定し、外部被ばく線量の評価法から逆算すると、ビキニ環礁に近いロングラップ環礁で観測された沈着密度を遥かに超えることになり、爆心から離れるにつれて放射性降下物の量が減少するという事実明らかに矛盾すること、さらに当該漁船が実験の位置から約 1,400 km の距離で 300 mSv の被ばくが起きるとすれば、爆発地点近くに概ね 24 時間以内に降下する高線量の局地放射性降下物が船上に落ちたことになるが、そういう報告はない。また染色体異常の頻度の検査からの線量推定は、急性被ばくのための検量線を使用しており、今回評価した外部被ばく線量率の結果は、最大でも 0.021 mSv/時間であり、同じ 0.9% の異常の頻度増加であっても、本来使用するべき検量線を使用した場合、推定被ばく線量は約 100 mGy ではなくて約 400~500 mGy になる。この結果は、ESR の結果とも一致しない。

E. 結論

マーシャル諸島のビキニ環礁で計 6 回の水爆実験が行われた。米軍等の放射線モニタリング結果と船舶毎の航路情報、魚の汚染レベルから当該水爆実験後にこの海域で操業もしくは、通過したとされる 8 漁船(第 13 光栄丸、第 7 大丸、第 11 高知丸、第 2 幸成丸、第 5 海福丸、第 5 明賀丸、第 8 順光丸及び第 1 月山丸)について、乗組員の被ばくによる線量を評価した。請求者、星氏及び豊田氏の資料、Tanaka 等の文献の分析からは、明らかにこの実験による放射線による被ばくが健康影響に及ぼすものであ

ることを確認することはできなかった。また評価した外部及び内部被ばくによる線量は、一定の仮定に基づく条件の下に分析した結果、2.36 mSv 程度と見積もられた。評価方法により線量に相異が出ることはあるが、オーダーが変わることはない。

本報告書で得られた線量評価結果は、国際放射線防護委員会（ICRP）を含め、国内外の専門機関で得られている科学的知見に照らして、がん死亡のリスクが線量とともに徐々に増えることが明らかになっている100 mSv を大きく下回っている。これらの分析結果から、放射線による健康影響が現れる程度の被ばくがあったことを示す結果は確認できなかった。

F. その他

本報告書は、下記の専門家を含めた「船員保険における放射線等に関する有識者会議」7名で議論した。

飯本 武志	東京大学環境安全本部 教授
鈴木 元	国際医療福祉大学 教授
中川 恵一	東京大学医学部附属病院 放射線科 准教授

G. 参考文献

1. ビキニ海域における放射能影響調査報告（第一輯）（昭和30年3月水産庁調査研究部）
2. 昭和29年におけるビキニ海域の放射能影響調査報告（第2集）（昭和30年11月水産庁調査研究部）
3. マーシャル諸島のビキニ環礁における水爆実験に関する厚生労働省の公開資料（平成26年9月・10月）
4. 平成26年度厚生労働科学特別研究事

業「ビキニ水爆関係資料の整理に関する研究」報告書

5. 平成27年度厚生労働健康安全・危機管理対策総合研究事業「ビキニ水爆関係資料の線量評価に関する研究」報告書
6. World Health Organization, 2012. Preliminary dose estimation from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami.
7. 天野慶之, 山田金次郎, 尾藤方通, 高瀬明, 高瀬明, 田中昭二. 1955. 放射能汚染魚に関する研究－I. 魚体組織の放射能について. 日本水産学会誌, 20, 907-915.
8. Simon SL, Bouville A, Melo D, Beck HL, Weinstock RM. 2010. Acute and chronic intakes of fallout radionuclides by Marshallese from nuclear weapons testing at Bikini and Enewetak and related internal radiation doses. Health Phys. 99, 157-2000.
9. Hsieh WA, Deng W, Chang WP, Galvan N, Owens CL, et al. Alpha coefficient of dose response for chromosome translocations measured by FISH in human lymphocytes exposed to chronic ^{60}Co gamma rays at body temperature. Int J Radiat Biol. 1999, 75, 435-439.
10. Lloyd DC, Purrott RJ, Dolphin GW, Bolton DAWN, Edwards AA. The relationship between chromosome aberrations and low LET radiation dose to human lymphocytes. Int J Radiat Biol 1975, 28, 75-90.

II. 第13光栄丸船員の赤血球数と 血色素値からの放射線影響評価

第 13 光栄丸船員の赤血球数と血色素値からの放射線影響評価

要 旨

請求者から提出された「第 13 光栄丸の船員 24 名の貧血について」（第 13 光栄丸船員）に関して、放射線の影響を評価することが可能どうかを検討した。提出されたのは、第 13 光栄丸の 24 名の船員の赤血球数、血色素量、白血球数である。検査が行われた昭和 29 年 3 月 30 日、4 月 7 日、5 月 4 日は、被ばくされたとされるブラボー実験からそれぞれ 29 日、37 日、61 日後に相当する。明らかに誤記と思われる結果を除いて、正常値より低い結果は赤血球数と血色素量に観察された。これが放射線による被ばくによる影響であるとすれば、より感受性が高い白血球数に変化が現れる。被ばく約 1 ヶ月後に放射線により赤血球数と血色素量に影響が観察されるとすれば、少なくとも 1,000 mSv 以上の被ばくが必要であり、その時は白血球数の減少が観察される。また約 60 日後に赤血球数と血色素量の減少がある場合も、白血球数は減少する。しかしながら、2 回の検査からは、白血球数の減少はない。以上より提出された結果から、赤血球数、血色素量が放射線被ばくに原因するとは言えず、また被ばく線量を推定することは困難である。

A. 目的

今回提出された、第 13 光栄丸の 24 名の船員の赤血球数、血色素量、白血球数から、1954 年 3 月 1 日のブラボー実験時にビキニ環礁の東方約 1,200 km の位置に滞在したとされる第 13 光栄丸の乗組員の、被ばく線量を推定することが可能かどうかを検討する。

B. 評価方法

米国 Department of Health & Human Services 保健福祉省は、「Radiation Emergency Medical Management 被ばく医療処置」の中で、

「Radiation Effects on Blood Counts 放射線による血球数への影響」を公開している(2016 年 1 月 13 日更新)(図 1、2)¹⁾。1 Gy (グレイ)に被ばくをすると、全ての血液の中を流れる細胞(血球)数に影響が現れることがある、としている。線量が増加すると、影響は大きく、また早期に現

れる。特に感染症や免疫に関係している白血球数に関しては、チェルノブイリ事故の結果から推定される影響を示している。これを参考に、被ばく後それぞれの細胞の減少曲線を比較することで放射線による線量の推定の可能性を検討した。

血液中を流れる細胞には、酸素を運びヘモグロビンという血色素をもつ赤血球、血液を凝固させる血小板、感染症や免疫に関係する白血球があり、それぞれ放射線に対する抵抗性が異なるため、それぞれの細胞の減少曲線を比較することで放射線による線量を推定出来る事がある。白血球には大きく分けて、主に骨髄由来の細胞である顆粒球とリンパ節由来のリンパ球がある。通常顆粒球のうち大部分は好中球が占める。リンパ球は最も放射線に対する感受性が高く、リンパ球数は 500 mGy (γ線であれば 500 mSv、ミリシーベルト)、顆粒球数は 1 Gy (γ線で

あれば 1,000 mSv)、ぐらゐの被ばくまでは減少しない。放射線被ばくでは、血色素値は赤血球数とほぼ同じ変化を示し、1 Gy 程度の被ばくでは現れない。3 Gy の被ばくをすると、血色素の値は 15 g/dl が 11 から 12 g/dl まで、20-27 % ぐらゐの減少が起きるが、この線量では白血球数

と血小板数ともそれぞれ 1,000/mm³、10,000/mm³ 以下になる。これらの知見は被ばく医療の世界では、共通認識である(図 3)。即ち、放射線影響による血球数の低下は、赤血球数・血色素量よりも白血球数の方がより低い放射線量で起こり、低下の程度も大きい。

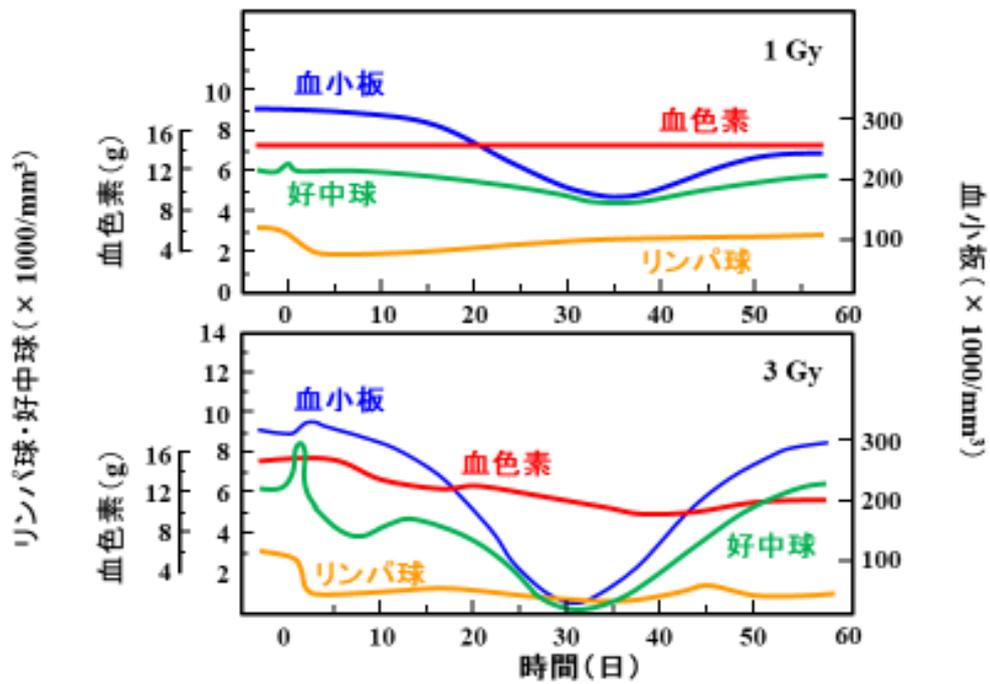


図 1 放射線による血球数への影響-1Gy と 3Gy

Radiation Effects on Blood Counts (1) – Illustration から引用 <https://www.remm.nlm.gov/radefectblood.htm>

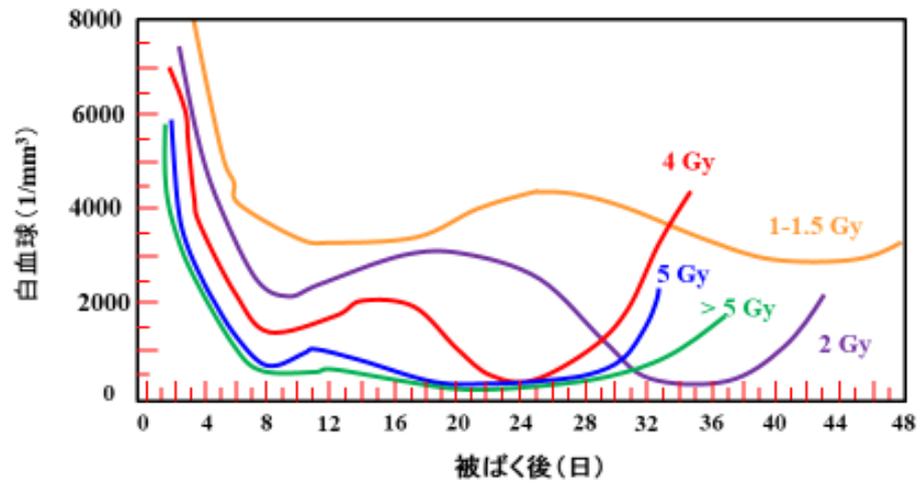


図2 放射線による白血球数への影響- 1Gy - 5Gy

チェルノブイリ事故の間に、放射線に被ばくした患者の白血球数から算出

Radiation Effects on Blood Counts (1) – Illustration から引用 <https://www.remm.nlm.gov/radeffectblood.htm>

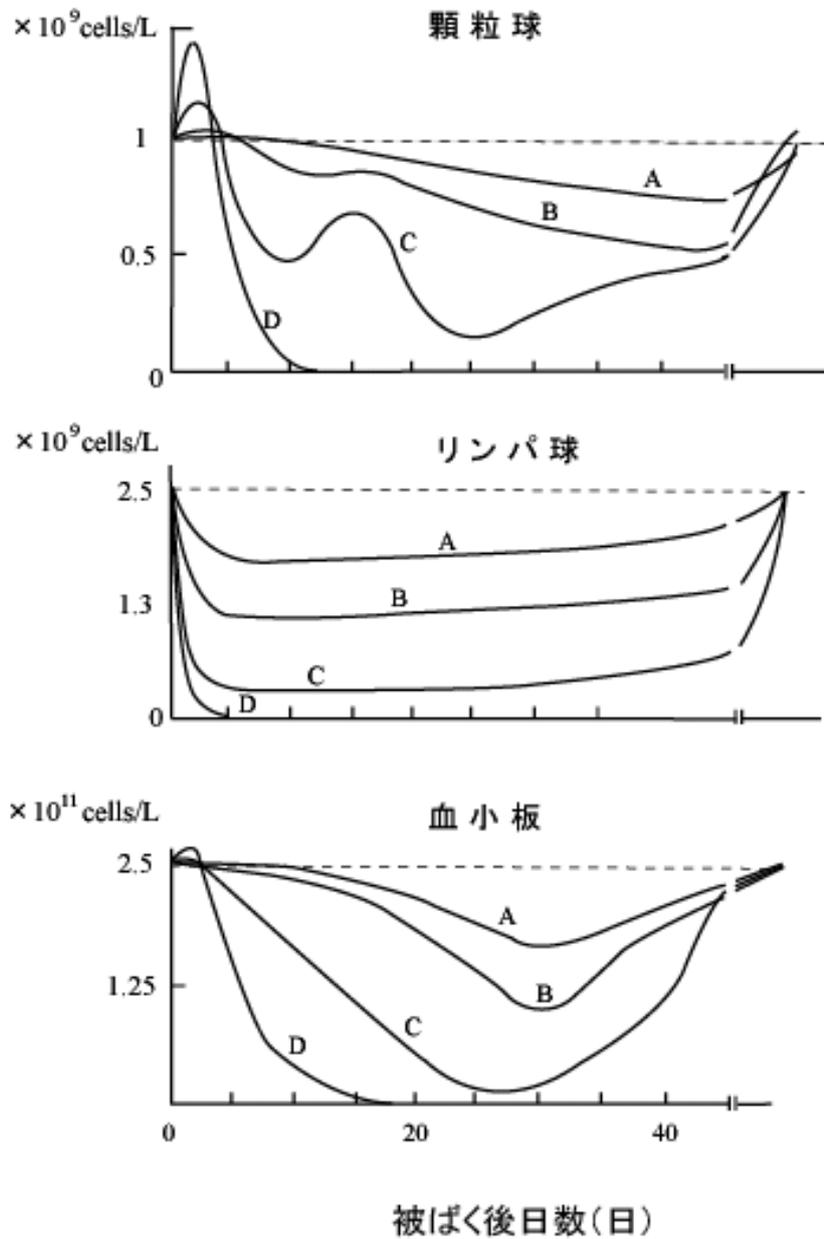


図3 被ばく後の血球数の変動

A: < 1 Sv、B: 1 - 2 Sv、C: 2 - 5 Sv、D: > 5 Sv

Nickson JJ. Industrial medicine on the plutonium project : 1951 ; 308-37.

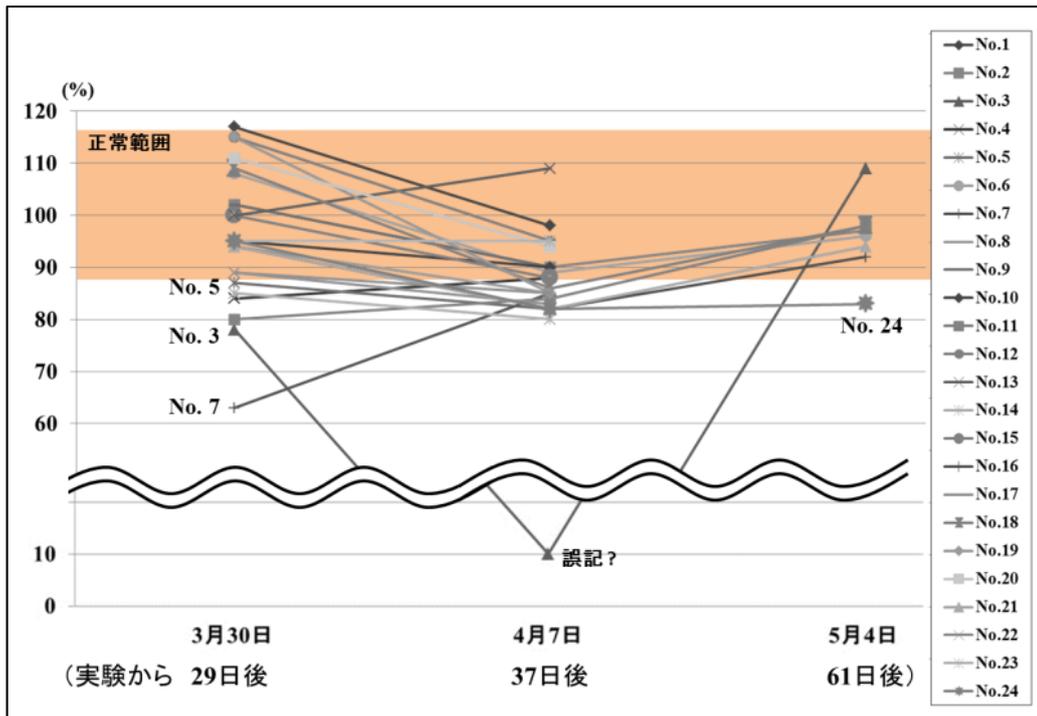
C. 結果

検査が行われた昭和29年3月30日、4月7日、5月4日は、それぞれ29日、37日、61日後に相当する。このうち3回検査を受けたのは8名である。

① 赤血球数

赤血球数に関して、基本的には赤血球数は血色素量と並行する。29日、37日、61日後の検

査における中央値、平均値に大きな相異はない(中央値427-473万/mm³、平均値417-459万/mm³)。最小値は29日後、37日後とも番号5の船員で、それぞれ262万/mm³、312万/mm³である。61日後の検査では、番号11と18の船員が正常値を正常値を下回り、それぞれ307万/mm³、312万/mm³である。

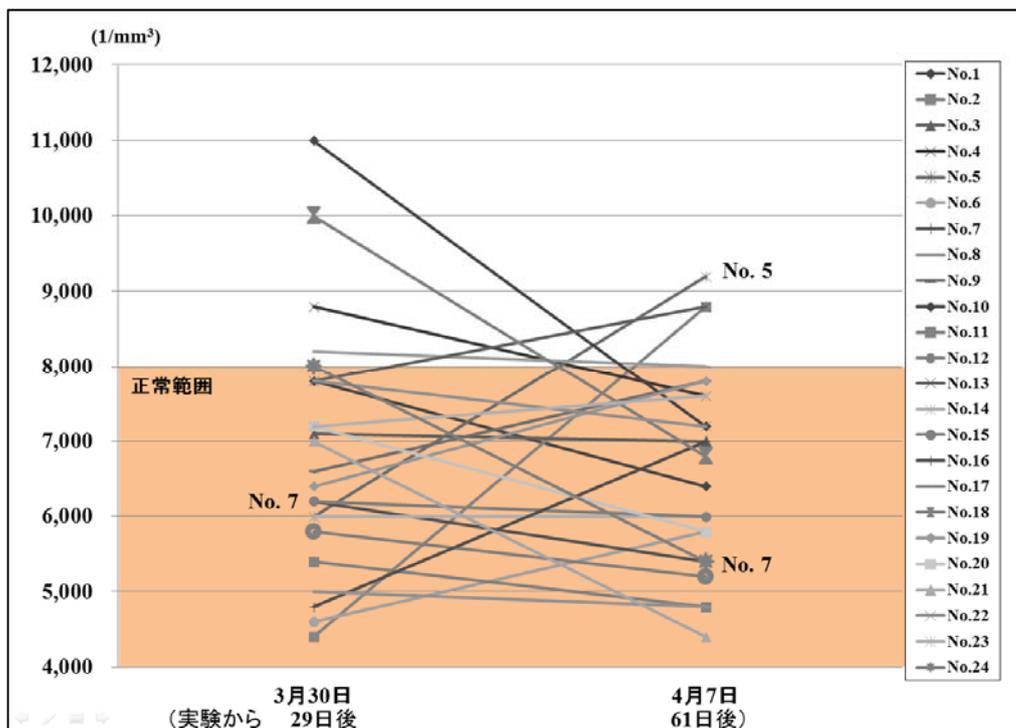


血色素量

③ 白血球数

白血球数は、正常値が $4,000/\text{mm}^3$ から $8,000/\text{mm}^3$ とされており、29 日後の採血では、平均値 $6,881/\text{mm}^3$ 、最低値が $4,000/\text{mm}^3$ 、最高値

が $11,000/\text{mm}^3$ 、37 日後の採血では平均値 $6,700/\text{mm}^3$ 、最低値が $4,400/\text{mm}^3$ 、最高値が $9,200/\text{mm}^3$ であり、正常値の下限以下の船員はなく、2 回の採血で急激な変化は観察されない。



白血球数

D. 結論

今回提出されたデータの中に、赤血球数と血色素量が正常より低い船員がいた。しかしながら被ばく約1ヶ月後(29日及び37日後)の検査で、放射線により赤血球数と血色素量に影響が観察されるとすれば、少なくとも1,000 mSv以上の被ばくが必要であり、白血球数の減少が観察されるが、2回の検査からは、白血球数の減少は認められない。また61日後に血色素がやや低い船員は、以前の29日及び37日後の検査で白血球数の減少はない。

以上より、提出された結果から赤血球数と血色素量の減少が放射線によるとはいえ、またこれらの資料から放射線被ばくの線量を推定することは困難である。

【用語解説】

白血球：

血液の細胞成分の一つであり、骨髄に由来する顆粒球と単球、またリンパ組織に由来するリンパ球の3種がある。顆粒球には好中球、好酸

球、好塩基球があり、体内に侵入する細菌や異物に対し、食作用により防御の役割を果す。

リンパ球：

抗体を作り出す働きによって免疫機能に重要な役割を果す。

赤血球：

血液を構成する成分の一つであり、血色素(ヘモグロビン)を含み、酸素と二酸化炭素を運び、ガス交換の機能を有する。一般に貧血は、血液中の赤血球数が著しく減少するため、ヘモグロビンも減少、ガス交換の機能が阻害され、組織の酸素不足が生じる。

血小板：

血液を構成する成分の一つであり、血管壁が損傷した時に集合してその傷口をふさぎ止血する作用を持つ。骨髄中の巨核球にある細胞突起がちぎれて血管内に放出される小細胞片である。

【参考】

1. <https://www.remm.nlm.gov/>

Ⅲ. 外部被ばくによる線量の評価

外部被ばくによる線量の評価

要 旨

1954年（昭和29年）3月から5月にかけて行われたビキニ水爆実験によって被災したとされる漁船（第13光栄丸、第7大丸、第11高知丸、第2幸成丸、第5海福丸、第5明賀丸、及び第8順光丸）について、乗組員の外部被ばくによる線量を評価した。

文献値をもとに、ブラボー実験における局地放射性降下物の¹³⁷Cs沈着密度分布図、ブラボー、ロメオ、クーン、ユニオン及びヤンキー実験における対流圏放射性降下物の¹³⁷Cs沈着密度分布図をそれぞれ作成し、漁船の航路の重ね合わせから外部被ばくによる線量を評価したところ、線量は最大で307 mR（実効線量で2.20 mSv相当）と算出された。ただし、これは、無限に広い甲板への放射性降下物の沈着を仮定するなどした値である。また、汚染海水を利用した入浴による被ばく線量は極めて小さな値になることが分かった。

A. 目的

1954年（昭和29年）3月1日から5月14日にかけて、米国が太平洋諸島信託統治領（現在のマーシャル諸島共和国）のビキニ環礁及びエニウェトク環礁において実施した核実験によって被災したとされる漁船の乗組員について、外部被ばくによる線量を評価する。この評価は、以下の漁船を対象とする。

漁船名	該当する核実験の名称
第13光栄丸	ブラボー
第7大丸	ブラボー
第11高知丸	ブラボー、ロメオ
第2幸成丸	ブラボー、ロメオ
第5海福丸	ロメオ
第5明賀丸	ロメオ、クーン
第8順光丸	クーン、ユニオン、ヤンキー

なお、評価の方法は、報告者による先行研究（厚生労働科学研究費補助金による研究報告「ビキニ水爆関係資料の線量評価に関する研究 平成27年度総括・分担研究報

告書」[1]（以下、「厚労科研報告書」と略す）を基本としたが、これは1回目のブラボー実験のみへの適用を前提に構築された方法であったため、その適用を2回目のロメオ実験以降に拡張するにあたって方法の一部を見直した。

背景

1954年に米国がマーシャル諸島のビキニ環礁で実施した核実験によって第五福竜丸が被災し、その乗組員に放射性降下物による急性放射線障害が生じたこと、また第五福竜丸以外にも、マーシャル諸島の近海等で操業していた多くの漁船の漁獲物等に放射性降下物による放射性表面汚染が生じ、日本の水産業に多大な被害を及ぼしたことは、俗に「ビキニ事件」とも呼ばれる社会的な事件として広く知られている。

本事件については、その発覚後、物理・化学、気象学、農学、水産学、そして放射線医学的見地に基づく多くの調査・研究が行われ、それらは1,800頁にも及ぶ日本学

術振興会の報告書としてとりまとめられた[2]。また、1984年には、「ビキニ事件から30年」と題する特集[3]が *Isotope News* 誌で生まれ、対応にあたった病院、大学、報道等関係者（約30人）の当時の思い出や苦労話がとりまとめられた。また、翌1985年に同誌は、アメリカ原子力委員会の *Health and Safety Laboratory (HASL)* の所長（当時）であり、本事件の対応のため来日した *M. Eisenbud* の回想の講演録を掲載した[4]。これらの資料から報告者が受けた印象は、「放射線による健康影響の追跡調査が継続されていた第五福竜丸乗組員は別にして、事件そのものによる直接的な影響の調査は既に終わっている」というものである。これは、少なくとも1980年代半ば当時における我が国での一般的な認識とそう違わないはずである。

こうした一方で、第五福竜丸以外の、マーシャル諸島周辺海域にいた漁船等の元乗組員やその家族及び支援団体から「元乗組員の健康被害等が過小に評価されている」という主張が近年なされてきた。彼らがその主張の論拠としてあげるものは、(1) 核実験に関わる物理現象（いわゆる「降灰」等）の目撃や放射線による急性障害的な症状についての元乗組員による証言、(2) 米国の観測資料についての独自の分析と解釈、(3) 元乗組員の歯の *ESR* 測定から 300 mSv を超える線量に相当する強度の信号が観測された等である。過去の定説が新しい発見によって覆されることはままある。しかしながら、上記の論拠とされるものについては、その信憑性に疑わしい点が少なくない。例えば、支援者団体の開示請求によって近年見つかった漁船等の航路情報から、第五福

竜丸を除き「降灰」が目撃できる領域内に船はいなかったことが既に明らかとなった[1]。また、支援者の一人は、その著書（53頁）¹の中で、米国の資料に基づき分析した数値として「第五福竜丸を含む五隻が、 $3 \sim 5 \text{ Sv/h}$ に相当する海域にいた」と主張する。しかし、この線量率は後述するように10万倍も過大な誤った見積もりである。 300 mSv を超える信号が観測されたとされる歯についても、その歯の提供者が乗る漁船の位置はビキニ環礁の東方約 $1,400 \text{ km}$ であり、核実験当時の観測記録や近年の線量再構築作業の結果と照らし合わせたとき、当該距離において推定される線量の値に比べて、あまりにも大きく乖離した値であると言わざるを得ない。支援者団体の一人は、その歯が、「笑ったときに外へ出る歯」²であること、すなわち *ESR* 測定による線量評価に適切とされる大白歯ではないことを明言している。このように、主張の論拠とされるものは、いずれも確たる証拠と言えるようなものではない。

本報告書は、核実験当時にマーシャル諸島近海等で操業していた漁船の乗組員らが、上記の不確かな証拠に基づくやや常識外とも思える主張を報道などによって聞いてきたこともその遠因に、長年にわたって抱いてきたであろう核実験による健康影響への漠然とした不安に対する明解な回答を用意する意味でも有益であるに違いない。

¹ 山下正寿, 核の海の証言 ビキニ事件は終わらない, 新日本出版社 (2012年).

² 山下正寿, ビキニ事件は終わらない・・・そしてフクシマ, 「京都被爆2世・3世の会」会報 No.45, (2016年).

B. 事実の確認

1. 核実験の日時と場所

1954年3月から5月にかけて合計6回実施された核実験の諸元（実施日時、実験名（コードネーム）及び核出力）を表1に示す。1～5回目で使用された核爆弾は、高温による核融合反応（熱核反応）によって爆発力を高めた水素爆弾であり、ビキニ環礁で爆破された。6回目の核爆弾は、ブースト型核分裂兵器に分類されるもの（核融合反応を部分的に利用しているものの核出力へのその寄与は水素爆弾に比べて小さい）であり、エニウェトク環礁で爆破された。ブラボー実験とクーン実験は環礁の陸地部分で、そのほかは礁湖内の斛（はしけ）上で実施された。

図1に、マーシャル諸島の地図を示す。

表1 キャッスル作戦の核実験一覧

	実験日時 (現地時間) *	実験名 (コードネーム)	核出力 (Mt) **
1	3月1日 6:45	ブラボー	15
2	3月27日 6:30	ロメオ	11
3	4月7日 6:20	クーン	0.11
4	4月26日 6:10	ユニオン	6.9
5	5月5日 6:10	ヤンキー	13.5
6	5月14日 6:20	ネクター	1.69

* 現地の日の出時刻の30分前。なお、世界協定時間及び日本時間は、それぞれ-12時間、-3時間として換算する。

** TNT換算。広島と長崎に投下された原子爆弾の核出力は、それぞれ0.015 Mt, 0.021 Mtである。

2. 放射性降下物の分布範囲と被ばく線量

核実験による放射性降下物は、大きく「局所放射性降下物」と「対流圏放射性降下物」

に二分される³。これらの分布範囲と、それに伴う被ばく線量について、核実験当時に観測されたデータをもとに以下に示す。

(1) 局地放射性降下物

ビキニ環礁近海では、風は、対流圏上層で東に、地上付近で西に一般に向かう。このうち、爆心から比較的近距离に降下し、高線量の被ばくをもたらす局地放射性降下物の分布に最も影響するのは、対流圏上層の風である。核実験当時に行われた観測によれば、その風向きは、

ブラボー：東北東に

ロメオ：北～北西に

クーン：北北東～北東に

ユニオン：北東に

ヤンキー：北東～東北東に

ネクター：北に

である[5,6]。なお、同様の報告は、三宅ら[7]によって1954年当時に既になされていた。

線量評価の対象とする漁船のうち、ブラボー実験時にビキニ環礁の東(>1,000 km)にいた第13 光栄丸及び第7 大丸は、ブラボー実験による局地放射性降下物（のうち約三日目以降に降下する成分）の影響をわずかに受けた可能性がある[1]。一方、ロメオ実験による局地放射性降下物は、北西側海域に広がったため、核実験当時に東側海域にいた漁船（第11 高知丸、第2 幸成丸、第5 海福丸及び第5 明賀丸）への局地放射性降下物の影響はない。また、核出力の小さいクーン実験についても、局地放射性降下

³ 局地放射性降下物 (local/early fallout) と対流圏放射性降下物 (worldwide / tropospheric/delayed fallout) は厳密には区分できないが、一般には、核実験から24時間以内に降下する成分を前者とする。詳細については、厚労科研報告書を参照のこと。

物の降下範囲は北側数 100 km 内の海域にとどまるため、同様に東側海域にいた漁船への影響はない。ユニオン実験及びヤンキー実験については、風下の東側海域に第 8 順光丸がいたが、爆心から十分に離れている（仮に放射性降下物が到達するとしても四日目以降であり、それ以前にその多くは海面に降下する）ため、局地放射性降下物による影響は小さいと見られる。

こうした状況は、ブラボー実験の爆心から風下約 150~200 km の海上で、爆発の数時間後から局地放射性降下物を受けた第 5 福竜丸とは、根本的に異なる。

(2) 対流圏放射性降下物

対流圏放射性降下物は、核爆発によって生成された放射性デブリのうち粒径の小さなもので、対流圏内の気流によってより遠方まで運ばれ、主に降雨等によって地表に沈降する。局地放射性降下物（特に爆発後数時間内に降下するもの）とは対照的に対流圏放射性降下物は目には見えない。

キャッスル作戦での核実験からのものを含む対流圏放射性降下物の世界的な分布は HASL（現在、国土安全保障省 National Urban Security Technology Laboratory）によって、粘着紙を用いて観測された。その結果は、US Weather Bureau（現在、国立気象局）の List によって 1955 年に報告書にとりまとめられた[8]。その報告書に示された 1954 年 7 月 1 日時点での放射性降下物の合計（単位 dpm/ft^2 : 1 平方フィート当たりの毎分崩壊数）の等値線図を図 2 に示す。対流圏放射性降下物は主に東西に広がる。なお、1980 年代になって公開（機密解除）されたこの報告書は、「対流圏放射性降下物の世界的広がりを示す資料」などと

して、報道等でしばしば紹介されるが、同じ観測データは 1956 年に Science 誌で既に発表されていた[9]。

(3) 外部被ばくによる線量

マーシャル諸島及びその近隣諸島について、核実験当時に行われた航空機モニタリング等に基づき評価された外部被ばくによる線量[10]を表 2 に示す。この値には局地放射性降下物と対流圏放射性降下物の両方による線量寄与が含まれる。合計 6 回の核実験のうち、線量寄与の最大は 1 回目のブラボー実験である。10 R（周辺線量当量で約 100 mSv に相当）を超える照射線量は、ビキニ環礁の東側約 500 km までの範囲（アイリンギナ、ロンゲラップ、ロンゲリック、ビカール、ウチリック及びタカ環礁）で観測され、このうち住民及び米軍が滞在していたアイリンギナ、ロンゲラップ、ロンゲリック及びウチリック環礁からその者らの避難が行われた。一方、ビキニ環礁の北のウェーク島、北東のタオンギ環礁、南東のマジュロ環礁等での線量は相対的に低い。なお、これら核実験当時なされた線量評価値は、Simon らによって近年行われた線量再構築の結果[11]と大きく違わない。

また、マーシャル諸島のみならず近隣の別諸島を含む世界的な範囲での影響という意味では、前述の粘着紙の観測値（1955 年 9 月までの観測に基づく）を、外部被ばくによる線量に換算した結果は、早くも 1955 年に Science 誌で報告された[12]。参考までにその結果の一部を図 2 の等値線図に転記した。ここで、線量の単位は吸収線量(mrad)であるが、 $1 \text{ mrad} \doteq 10 \mu\text{Sv}$ と概算して差し支えない。粘着紙をもとに評価された外部被ばくによる線量は、いずれの地点でも低

い。また、これらの数値は、全ての核実験（キャッスル作戦以前を含む）による寄与を含むものであること、線量の積算期間が無限大であること、風化作用や建造物等による遮へいによる影響を考慮していないことなどから、実際に受けた線量は、より小さな値になる。マーシャル諸島西方の海域や日本近海を航行した船舶等からも船体の軽微な汚染が当時報告されているが、それらの乗組員の外部被ばくによる線量も相応に低いレベルにとどまると考えられる。

なお、図 2 に示した等放射能線をもとに、「20 万 dpm/ft^2 海域は 3~5 Sv/h に相当し、その海域に第 5 福竜丸を含む 5 隻が居た」とする主張（背景参照）とそれに基づく報道⁴があるが、この線量率換算は誤りである。首都マジュロ（図 2 で約 15 万 dpm/ft^2 ）で核実験当時に観測された最大線量率は、約 1~2 mR/h （周辺線量当量率で約 10~20 $\mu\text{Sv/h}$ に相当）[10]であり、したがって、20 万 dpm/ft^2 に相当する等放射能線もそれと同じくらいのオーダーの線量率だったと推定される。すなわち 3~5 Sv/h には到底達し得ない。

(4) 日本で観測された放射性降下物と船舶の表面汚染との関連性

キャッスル作戦による対流圏放射性降下物の一部は、気流によって日本列島にまで飛来し、主に降雨とともに地表に落ちたことはよく知られている。いわゆる「放射能雨」によるこの汚染を表面汚染サーベイメータ（GM 計数管）で観測した事例があるので紹介する。

科学研究所（当時）の大塚[13]によると、

⁴ 高知新聞、ビキニ被爆から 62 年 漁船乗組員の救済へ高知から第一歩、2016 年 3 月 1 日

1954 年 4 月上旬に、東京の屋外で 200~300 cpm 、排水溝付近で 500~600 cpm の計数率が観測されたという。これは、前述した List の報告[8]に照合すると、東京で 4 月 11 日 21:30~4 月 12 日 21:30（日本時間）に観測された放射能の急激な増加（約 50 dpm/ft^2 、それ以前は数 dpm/ft^2 ）に対応するものとみられ、3 月末に行われたロメオ実験の影響と考えられる。このことは、表面汚染サーベイメータによって容易に観察できるだけの汚染が、マーシャル諸島近海だけでなく、日本列島においても生じていたことを示すものである。

同じ List の報告によれば、日本における放射能の最大は、ヤンキー実験後の 5 月 16 日 21:30~5 月 17 日 21:30（日本時間）に東京で観測された $>1,000 \text{ dpm/ft}^2$ である。これは、大塚の報告をもとに単純な比例計算をすると、10,000 cpm を超える計数率に相当する。したがって、この時期に日本近海を航行していた、あるいは入港してきた船舶（例えば、5 月 18 日に三崎港に寄港した第 8 順光丸）についても、同様の比較的高レベルの汚染が生じた可能性がある。なお、このような汚染があったとされる場合でも、外部被ばくによる線量は十分に低いことに注意する必要がある。文献[12]によれば、（図 2 に示したように）東京での対流圏放射性降下物による線量は、13 mrad （ $\equiv 130 \mu\text{Sv}$ ）に過ぎず、しかもこれは前述したように無限の積分期間での値である。

C. 線量の評価方法

1. 放射性降下物の分布とそれに基づく線量（率）の計算の基本的考え方

各漁船について外部被ばくによる線量を

評価するにあたり、厚労科研報告書[1]で提案した方法を基本とする。報告書(図4)に示したように、放射性降下物の地表沈着密度(単位面積当たりの放射能)が推定できれば、核実験時刻からの経過時間の関数として、その場所における線量率を計算することができる。

Beckら[14]は、マーシャル諸島の約30の環礁における放射性降下物の沈着密度(代表核種である ^{137}Cs の沈着密度)とその到着時間(TOA: Time of Arrival)⁵を報告した。これらの数値を内外挿することによって任意座標における沈着密度と到着時間のマップを作成する。これにあたって、地表への降下メカニズムの異なる局地放射降下物と対流圏放射性降下物それぞれについて、以下に概略する方法を用いる⁶。

① 局地放射性降下物分布

計算モデルには、Normentが開発した放射性降下物分布予測コードDNAF-1[15]のものを用いる。このコードは、陸上での核実験で観測された粒径分布を持つ粒子の高高度からの水平投射を計算するものであり、様々な核出力(降下の始点になる高度が変わる)における粒子の地表沈着の割合が爆発後の経過時間の関数として解析的な表現(数式)でコードに組み込まれていることを特徴とする。計算に必要な情報は、核出力(0.1 kt~100 Mt)、実効的な風速等である。DNAF-1の計算結果は、任意の位置における単位面積当たりの放射性降下物の量と、それにKファクターと呼ばれる換算係

数を乗じて得られる照射線量率(R/h)であるが、ここでは前者の相対分布に着目し、それを、代表的な環礁における ^{137}Cs 沈着密度[14]で規格化することによって、局地放射性降下物の降下範囲の全域にわたる ^{137}Cs 沈着密度分布を得る。

計算の対象は、ビキニ環礁の東側海域で局地放射性降下物が観測されたブラボー実験とする。計算値の規格化点は、放射性降下物の降下範囲のほぼ中心線上に位置し、かつ多くの漁船等が滞在していた東側の海域に近いビカール環礁とし、その方位における風速は、距離とTOAから8.3 m/s(30 km/h)とする。一方、ブラボー実験以外については、前述したように、局地放射性降下物による影響を受けたと考えられる船が見当たらないことから、計算しない。

② 対流圏放射性降下物分布

この計算には、大気中の放射性デブリ濃度(とそれに比例する放射性降下物の地表への沈着密度)を爆心地からの距離を底とする冪演算(=距離の n 乗)で表現する経験的なモデルを用いる。これは、厚労科研報告書で使用したガウスブルームモデルよりも汎用性が高い⁷。ここでは、冪指数 n をフリーパラメータとし、ビキニ環礁近くの「始点」とマーシャル諸島の領海以遠の「終点」での観測値等にそのカーブをあてはめることによって最適な冪指数 n を定める。

「始点」には、Beckらのデータ[14]をもとに、ビキニ環礁から距離500 km、方位 0° (北)~ 180° (南)の半円上の任意の座標における ^{137}Cs 沈着密度を補間(ordinary kriging)によって算出した値を用いる。一

⁵ 厚労科研報告書の図2及び図3を参照。

⁶ 本報告書では、厚労科研報告書と同様に、高高度からの放射性デブリの水平投射を実験当日の天候情報を利用して計算するものを「局地放射性降下物」、それ以外のものを「対流圏放射性降下物」とする。

⁷ ガウスブルームモデルは、取扱いが簡便である反面、定常的な線源項を前提としたモデルであるため、適用範囲に限りがある。

例として、**図 3** 及び **図 4** に、それぞれブラボー実験及びロメオ実験について、上記の補間によって算出した、距離 500 km における ^{137}Cs 沈着密度を方位の関数として表したものを示す。図の縦軸は、沈着密度に距離を乗じた値、実線は、補間値である。ブラボー実験で観測された放射性降下物には、局地放射性降下物と対流圏放射性降下物が含まれるが、前者の影響を明らかに受けたと考えられる環礁（アイリングナ、ロンゲラップ、ロンゲリック、ビカール、ウチリック及びタカ環礁）を除くデータから、後者のみの分布を推定する。これに対して、ロメオ実験で観測された放射性降下物はいずれも対流圏放射性降下物である。方位別分布の一般的傾向は、ビキニ環礁の東で高く、南北で低い⁸。また、放射性降下物の到着時間についても、同じ補間手順を用いて、ビキニ環礁から任意の方位の距離 500 km 地点について算出し、その値で距離を除することによって方位別の風速に変換する。なお、ビキニ環礁から距離 500 km を本計算の始点として選定した理由は、その距離の前後に代表的な環礁（タオング、ビカール、ウチリック、アイルック等）が集中していること、それらの環礁が、多くの漁船が滞在していた海域の側に最も近い位置にあることである。

次に、「終点」は、ビキニ環礁から北（方位 10 度）約 850 km のウェーク島、東北東（方位 75 度）約 2,700 km のジョンストン島、東南東（方位 121 度）約 3,000 km のカントン島、及び西南西（方位 253 度）約 1,600 km のトラック諸島とする。次節で説

⁸ 厚労科研報告書では、ブラボー実験における対流圏放射性降下物の分布を、計算の単純化のため、全方位一様分布と仮定した。

明する方法によって計算される、これらの島における外部被ばくによる線量が文献値 [12] と合致するよう冪指数 n を調節する。決定の詳細については後述するが、本報告では最終的に $n = -3$ を用いる。

2. 外部被ばくによる線量（率）の計算方法
前述の考え方に基づき、任意の座標について算出された沈着密度 D を、次式を用いて、爆発後の経過時間 t における照射線量率に換算する。

$$X(t) = D \times C \times (t/12)^{-1.2} \quad \dots(1)\text{式}$$

$X(t)$: 爆発後の経過時間 t (h) における照射線量率 (R/h)

D : ^{137}Cs 沈着密度 (Bq/m²)

C : ^{137}Cs 沈着密度から、時刻 $t = 12$ (h) における全核種による寄与を含む照射線量率への換算係数 (R/h per Bq/m²)

ここで、 $X(t)$ は、放射性降下物の到着時刻 (TOA) 以降についてのみ計算される (到着時刻以前の $X(t)$ はゼロである)。換算係数 C は、陸地部分で行われた核実験 (ブラボーとクーン) についてはブラボー実験での係数 (1 mR/h at $t = 12$ が ^{137}Cs 29.1 Bq/m² に相当する) を、海上で行われた核実験 (ロメオ、ユニオン及びヤンキー) についてはロメオ実験での係数 (1 mR/h at $t = 12$ が ^{137}Cs 27.9 Bq/m² に相当) を使用する。これらの係数は、いずれも Hicks による計算値 [16] であり、 ^{137}Cs だけでなく短半減期核種による寄与も含まれる。

それぞれの漁船の航路に沿って、放射性降下物にちょうど遭遇する座標と時刻を捜査する。その座標に算出された放射性降下物は、そのまま船上に堆積し続けると仮定し、遭遇時刻から帰港時刻まで (1) 式を積分

することによって、積算照射線量を求める。さらに、曝露ジオメトリを考慮して、照射線量を実効線量に変換する（詳細は後述する）。なお、厚労科研報告書では、(1)式の線量率の 1/300 を海上からの線量率寄与として船の移動経路に沿って積分し合算したが、放射性降下物の海中への沈降を考慮していない不完全な計算モデルであること、船上に堆積した放射性降下物によるもの((1)式)と比べて、そもそも線量寄与として極めて小さな値にしかならないことの二つの理由により本報告ではそれを行わない。

3. 入浴による線量の計算方法

放射性降下物によって汚染した海水を使用して入浴した場合の線量を評価する。ここでは、入浴を海水浴で近似する。

各漁船位置における放射性降下物の沈着密度、放射性降下物の海中沈降速度 (m/h)、及び着水後の経過時間から、水の単位体積当たりの放射能 (Bq/m³) を算出し、それに換算係数を乗じて、その水に全身 (頭まで) が漬かった条件での実効線量率を計算する。入浴時刻は、現地時間で 18:00 (日本時間で 15:00)、入浴時間は、20 分間とする。

任意の座標と時刻における水中での実効線量率を、次式から計算する。

$$E(t) = DIF \times K \times (t/12)^{-1.2} \quad \dots(2)式$$

$E(t)$: 爆発後の経過時間 t (h) における実効線量率 (Sv/h)

D : ¹³⁷Cs 沈着密度 (Bq/m²)

F : 放射性降下物の沈降深さ (m)

K : 単位体積当たりの ¹³⁷Cs 放射能から、時刻 $t = 12$ (h) における、全核種による寄与を含む実効線量率への換算係

数 (Sv/h per Bq/m³)

ここで、 F は、サーモクラインに相当する深さ 100 m までは、沈降速度 (2.3 m/h) × 着水後の経過時間、100 m を超える場合は、100 m とする。沈降速度は米国の観測値 (文献[17]の図 4.2) である。また、換算係数 K は、Eckerman and Leggett による計算プログラム DC PAK3 (3.02)[18] に内蔵された核種別換算係数 (全身が汚染水に没した場合) を、ブラボー実験の放射性降下物の核種組成[16]で加重した値であり、1 μSv/h ($t = 12$ h) が ¹³⁷Cs 30.3 Bq/m³ に相当する。

D. 結果

1. 放射性降下物の分布とそれに基づく線量 (率) の計算

(1) 対流圏放射性降下物分布の計算における冪指数について

ウェーク島、ジョンストン島、カントン島及びトラック諸島について、冪指数 n を、-1.1~-1.4 (厚労科研報告書で採用したガウスプルームモデル)、-2、-2.5、-3 及び -3.5 に変化させて、それぞれの島における対流圏放射性降下物の沈着密度を求め、線量に換算した。文献値 (粘着フィルム観測に基づく線量 (積分期間: 無限)) [12] と比較した結果を表 3 に示す。 $n = -1.1 \sim -1.4$ とすると、計算は、文献値を 11~65 倍も過大に評価した。冪指数を -2.5~-3.5 にすると計算値は文献値に概ね一致し、特に距離が対象漁船のものに近いトラック諸島 (約 1,600 km) に着目すると、冪指数 -3 が最適値と考えられる。よって、冪指数 -3 を用いて計算した結果のみを以下に示す。

(2) 各漁船の線量評価結果

^{137}Cs 沈着密度及び到着時間のヒートマップに、対象とする漁船の航路を重ね合わせたものを、**図 5~16** に示す。航路とともに**図中**に示した数字は、それぞれの核実験の爆発時刻からの経過時間（マイナス符号は爆発までの時間）である。

それぞれの漁船について、放射性降下物に遭遇した推定される位置と時刻は以下の通りである。ここで、遭遇時刻は、船の航路が放射性降下物の到着と一致する時刻である⁹。

第 13 光栄丸

図 5：ブラボー実験の爆発時刻にビキニ環礁の東方約 1,400 km に滞在。操業中（北緯 9.8~10 度，東経 178~179 度付近），爆発の約 50 h 及び 70 h 後に局地放射性降下物と対流圏放射性降下物にそれぞれ遭遇したと推定される。

第 7 大丸

図 6：ブラボー実験の爆発時刻にビキニ環礁の東方約 1,200 km を南下中。操業中（北緯 9.2~9.6 度，東経 179 度付近），爆発の約 50 h 及び 76 h 後に局地放射性降下物と対流圏放射性降下物にそれぞれ遭遇したと推定される。

第 11 高知丸

図 7：ブラボー実験の爆発時刻にビキニ環礁の北方約 590 km の夜側の海域を東に航行中。その移動中（北緯 15 度，東経 170 度付近）に，爆発の約 39 h

後に対流圏放射性降下物に遭遇したと推定される。これは，放射性降下物の分布モデルの計算方法の見直しに伴って，厚労科研報告書から変更された点である。

図 8：ロメオ実験の爆発時刻にビキニ環礁の東方約 1,100 km に滞在。北緯 9.1 度，東経 175 度付近で操業中に，爆発の約 170 h 後に対流圏放射性降下物に遭遇したと推定される。

第 2 幸成丸

図 9：ブラボー実験の爆発時刻にビキニ環礁の北をマーシャル海域に向けて南下。その移動中（北緯 18 度，東経 167 度付近）に，爆発の約 120 h 後に対流圏放射性降下物に遭遇した可能性がある。これは，放射性降下物の分布モデルの計算方法の見直しに伴って，厚労科研報告書から変更された点である。

図 10：ロメオ実験の爆発時刻にビキニ環礁の東方約 1,400 km に滞在。操業終了後，北上中（北緯 11 度，東経 177 度付近），爆発の約 160 h 後に対流圏放射性降下物に遭遇したと推定される。

第 5 海福丸

図 11：ロメオ実験の爆発時刻にビキニ環礁の東約 870 km を北西に移動中。本船は，タオンギ環礁（北緯 15 度，東経 169 度）近くを爆発の約 36 h 後に通過する一方で，この環礁への放射性降下物の到着は約 60 h 後であるので[14]，放射性降下物に遭遇することなくこの海域を抜け出たと考えられる¹⁰。

⁹ 航路に沿って 1 時間毎に放射性降下物との遭遇の有無を検査し，遭遇前後の二点間内挿によって遭遇位置と時刻を決定した。なお，厚労科研報告書では，経緯度 1 度メッシュでこの計算を行っていたため，位置（時間）分解能がより精細になった。

¹⁰ 平成 26 年 9 月 19 日付厚労省開示資料 No.60 によると，「船体船員には若干の放射能の存在が認められたが，上より灰をかぶったと思われる部分になく海水につかる部分に出ている」とある。

第5明賀丸

図12：ロメオ実験の爆発時刻にビキニ環礁の東方約1,400 kmに滞在。北緯9.4度，東経178度付近で作業中に，爆発の約180 h後に対流圏放射性降下物に遭遇したと推定される。

図13：クーン実験の爆発時刻にビキニ環礁の東方約1,400 kmに滞在。北緯9.3度，東経178度付近で作業中に，爆発の約67 h後に対流圏放射性降下物に遭遇したと推定される。

第8順光丸¹¹

図14：クーン実験の爆発時刻にビキニ環礁の北北東約1,400 kmを南下中。移動中（北緯15度，西経176度付近）に，爆発の約100 h後に対流圏放射性降下物に遭遇したと推定される。

図15：ユニオン実験の爆発時刻にビキニ環礁の東方約2,700 kmに滞在。作業中（北緯9.9度，西経171度付近）に，爆発の約170 h後に対流圏放射性降下物に遭遇したと推定される。

図16：ヤンキー実験の爆発時刻にビキニ環礁の東方約2,400 kmを北上中。その移動中（北緯17度，東経179度付近）に，爆発の約75 h後に対流圏放射性降下物に遭遇したと推定される。

各漁船について，外部被ばくによる線量を評価した結果を表4に示す。計算された最大の線量は，核実験別では，

ブラボー実験：282 mR（第11高知丸）

ロメオ実験：43 mR（第2幸成丸）

クーン実験：26 mR（第5明賀丸）

ユニオン実験：2 mR（第8順光丸）

ヤンキー実験：6 mR（第8順光丸）

であった。また，漁船毎では，ブラボー実験とロメオ実験による線量の合計で，第11高知丸の307 (= 282 + 25) mRが最大であった。この値は，放射性降下物からの γ 線の平均エネルギー0.7 MeV [19]に対するICRP Publ. 74 [20]の回転ジオメトリにおける空気カーマ-実効線量換算係数0.817 (Sv/Gy)を用いると， $0.307 \text{ (R)} \times 8.76 \text{ (mGy/R)} \times 0.817 \text{ (Sv/Gy)} = 2.20 \text{ mSv}$ となる。ただし，これは，放射性降下物が一様に広がった無限大の甲板上に乗組員が一日当たり24時間立ち続け，かつ放射性壊変によるもの以外（例えば風化作用による）の放射性物質の減少が全くないという条件での値である。

また，各漁船上の線量率の変化及び放射性降下物との遭遇後の積算線量を，爆発後の経過時間の関数として表したものを図17~22に示す。それぞれの漁船における最大線量率は，第13光栄丸（図17）で0.89 mR/h，第7大丸（図18）で0.48 mR/h，第11高知丸（図19）で2.9 mR/h，第2幸成丸（図20）で0.28 mR/h，第5明賀丸（図21）で0.29 mR/h及び第8順光丸（図22）で0.11 mR/hであった。これらの中で，最大線量率2.9 mR/hは，上述した換算手順に基づくと，実効線量率0.021 mSv/hに相当する。

¹¹ 昭和29年に海上保安庁が作成した航路情報によれば，当該漁船の主たる漁労活動は西経海域で行われた。水産庁指定要報告区域への立ち入りは，その区域の東北端を往路と復路に通過したときだけである。

2. 入浴による線量の計算

図23に，ブラボー実験時におけるビカール環礁の陸上での照射線量率と，水中での

実効線量率を比較したものを示す。図では、 $1 \text{ mR/h} \simeq 10 \text{ } \mu\text{Sv/h}$ 換算によって、数値の大小をそのまま比較できるよう両縦軸のスケールを調整した。水中での実効線量率は、水が遮へいとして機能するため、陸上での照射線量率に比べて小さくなる。

ブラボー実験の際に汚染海域の中央を通過した第 11 高知丸を例に、海水浴又は海水の採取時刻を現地時間で 18:00（日本時間で 15:00）と仮定し、日々の入浴による実効線量を試算した結果を表 5 に示す。一日当たり 20 分の入浴で、実効線量は合計で $0.24 \text{ } \mu\text{Sv}$ となった。これは、前述した同漁船乗組員の外部被ばくによる実効線量 2.20 mSv に比べて極めて小さい。海水を利用する入浴による被ばくは無視してよい。

E. 考察

(1) 線量の増減要因

外部被ばくによる線量の増減要因として、(i) 降雨等気象条件による影響、(ii) 船の甲板面積の影響、(iii) 風化作用の影響等が考えられる。

このうち、(i)については、放射性降下物が通過する経路上のどのタイミングで降雨等が生じるかによって増減どちらも起こりうる。たとえば、降雨が、放射性降下物が漁船の直上をちょうど通過するときであれば、船上の沈着密度は増加し、漁船に到達する以前であれば、漁船位置では逆に減少する。前者による増分だけに着目すれば、それは平均して 10 倍[21]とも言われるが、核実験当時における局所的な天候の変化等による影響を推測するに足る観測データに乏しい。

(i)の要因は、その増減がある確率で生じ

るのに対して、(ii)及び(iii)の要因は、確実に線量を下げる。(ii)の甲板面積の影響については、厚労科研報告書でも指摘されているが、漁船の甲板面積で補正をすれば、線量は下がる。文献[22]によれば、半径 9 m の丸い汚染面に直立した場合の実効線量は、広い汚染での実効線量の約 1/3 になる。船についても（その船体サイズに依存するが）同程度の補正が見込まれる。また、現在の計算では、乗組員が船外の甲板上に滞在し続けることを前提にしている。船の内外の滞在時間（例えば、船外 8 時間+船内 16 時間）や遮へいの効果を含めれば、線量はさらに下がる。また、(iii)の風化作用の影響、すなわち風雨による放射性降下物の船上からの流出も、線量を下げる効果を持つ。第 5 福竜丸の乗組員の線量推計では、放射性壊変と船上での風化作用の両者の影響を含む線量率の減衰曲線として、爆発後の経過時間の $-1.4 \sim -1.6$ 乗で近似する計算式が提示された[23,24]。ここで、たとえば、 -1.5 乗を第 11 高知丸の線量評価に適用すると、ブラボー実験について評価された線量 282 mR は、 190 mR に下がる。(i)による増分は、仮にそれが生じたとしても、(ii)及び(iii)による減分によって相殺されると考えられる。

(2) 第 5 明賀丸について

「ビキニ環礁水爆実験の健康影響に関する健康等相談会講演集」[25]（以下、「講演集」と略す）及びそれに関連する報道によれば、第 5 明賀丸の乗組員の一人の歯の ESR 測定から 300 mSv を超える線量が観測されたとされる。ここで、 300 mSv は、実効線量ではなく等価線量（あるいは組織吸収線量の単位 Gy を Sv に読み替えたもの）に相当する値であると考えられるので、

概算で 30 R に等しい。

当該漁船について本報告で評価された線量は、ロメオ実験とクーン実験の合計で 49 mR である。仮に、この値を 30 R まで引き上げるには、計算の基礎となった ^{137}Cs 沈着密度（表 4：ロメオ実験で 77 Bq/m^2 及びクーン実験で 56 Bq/m^2 ）を約 610（ $= 30 \div 0.049$ ）倍すればよい。すなわち、ロメオ実験で 47 kBq/m^2 及びクーン実験で 34 kBq/m^2 の ^{137}Cs 沈着密度に相当する放射性降下物が無限大サイズの甲板上に降下して初めて 30 R に等しい被ばくがもたらされる¹²。

ロメオ実験及びクーン実験における各環礁の ^{137}Cs 沈着密度とビキニ環礁からの距離の関係を表した図に、本船について上記手順で算出した沈着密度を星印（★）で示す（図 24）。星印は、ビキニ環礁に近いロングラップ環礁での沈着密度を超えており、爆心から離れるにつれて拡散によって放射性降下物の量が減少する一般的な傾向に明らかに矛盾する。したがって、当該漁船の位置（約 1,400 km）において、乗組員に対して 30 R に相当する被ばくをもたらすだけの放射性降下物が船上に落ちたとは考えにくい。なお、星印で示した値は、(1)式の積分だけから算出される値であり、どのようにして ^{137}Cs 沈着密度を漁船位置まで外挿するかといった計算モデルの選択に一切依存しない。

(3) 第 8 順光丸について

講演集[25]によれば、本船は、「最も核実験場に近い海上（約 470 km）を通過した船」

¹² 参考までに、これらの ^{137}Cs 沈着密度を線量率に換算すると、放射性降下物の到着時刻（積分計算の開始時刻）で、64 mR/h（ロメオ実験）及び 150 mR/h（クーン実験）となる。

であり、乗組員の一人の染色体異常の検査結果から 295 mSv に相当する被ばくを受けたとされる。

ここで、当該漁船の航路については海上保安庁による詳細な調査結果があり、それによると、距離 470 km までビキニ環礁に近づいたという事実はない。表 4 に示したように、放射性降下物との遭遇は最短で約 1,600 km（ヤンキー実験）であり、線量も合計で 28 mR と推定される。

染色体異常の検査結果から推定したという線量 295 mSv を、上述した第 5 明賀丸での説明と同様に照射線量 30 R 相当と概算すると、それに相当する外部被ばくをもたらすには、表 4 に示した ^{137}Cs 沈着密度の約 1,000（ $= 30 \div 0.028$ ）倍、すなわちクーン実験、ユニオン実験及びヤンキー実験それぞれについて 40, 8 及び 15 kBq/m² を必要とする。これらの数値は、いずれも爆心地に近いロングラップ環礁での沈着密度と同等ないしはそれを超えるレベルであり、放射性降下物の距離による拡散を考えると起こりえない。なお、講演集では、第 8 順光丸や第 5 明賀丸以外にも 100 mSv を超える被ばくを受けたとされる船が幾つか紹介されているが、その中には、航路情報等からそもそも放射性降下物に遭遇したとは考えにくい船舶も含まれている。

F. その他の漁船の線量

厚労科研報告書で線量評価の対象とした第 12 高知丸、第 5 明神丸、第 10 宝成丸、瑞洋丸、第 12 宝幸丸及び尾形海幸丸について、本報告で使用した計算モデルに基づき、ブラボー実験による線量を再計算した結果を別紙に示す。

G. 結論

1954年（昭和29年）3月から5月にかけて行われたビキニ水爆実験によって被災したとされる漁船（第13 光栄丸，第7 大丸，第11 高知丸，第2 幸成丸，第5 海福丸，第5 明賀丸，及び第8 順光丸）の乗組員について，外部被ばくによる線量を評価した。結論は以下の通りである。

- (1) 線量評価の対象とした漁船の幾つかは，核実験による放射性降下物に遭遇したと考えられる。ただし，高線量被ばくをもたらすとされる局地放射性降下物に，核爆発から24時間以内に遭遇した漁船は見当たらない。これは，第5 福竜丸の乗組員やロンゲラップ環礁等の住民の被災状況とは根本的に異なる。
- (2) ブラボー，ロメオ，クーン，ユニオン及びヤンキー実験による局地放射性降下物及び対流圏放射性降下物について， ^{137}Cs 沈着密度分布図を作成し，漁船の航路との重ね合わせから，それぞれの船での ^{137}Cs 沈着密度及び外部被ばくによる線量を評価した。 ^{137}Cs 沈着密度は最大でも数 100 Bq/m^2 であった。これは，マーシャル諸島首都マジュロでの沈着密度と同程度の値である。また，線量は最大で 307 mR （実効線量で 2.20 mSv 相当）と評価された。ただし，これは，無限に広い甲板への放射性降下物の沈着を仮定するなどした値である。
- (3) 汚染海水を利用した入浴による被ばく線量は十分に小さい。

H. 参考文献

[1] 厚生労働省科学研究費補助金「ビキニ水爆関係資料の線量評価に関する研究」平成

27年度総括・分担研究報告書，(2016).

- [2] Committee for Compilation of Report on Research in the Effects of Radioactivity, Research in the effects and influences on the nuclear bomb test explosions, Japan Society for the Promotion of Science, (1956).
- [3] ビキニ事件から30年, Isotope News, 1984年3月号, (1984).
- [4] M. Eisenbud, ビキニ事件の追想と今後の放射線安全問題(1), Isotope News, 1985年2月号, p.8-12, (1985); ビキニ事件の追想と今後の放射線安全問題(2), Isotope News, 1985年3月号, p.22-27, (1985).
- [5] Martin, E. J., Rowland, R. H., CASTLE Series, 1954, Defense Nuclear Agency, DNA 6035F (1982).
- [6] Hawthorne, H. A., 1979. Compilation of Local Fallout Data from Test Detonations 1945-1962 Extracted from DASA 1251. Volume II-Oceanic US Tests, DNA 1251-2-EX, Defense Nuclear Agency.
- [7] 三宅泰雄, 有住直介, 磯野謙司, 田島英三, 1954. 日本に降った放射能雨, 科学, 24(8), 29-33.
- [8] List, R. J., 1955. World-Wide Fallout From Operation Castle. NYO-645(EX), US Atomic Energy Commission.
- [9] Machta, L., List, R. J., Hubert, L. F., "World-wide travel of atomic debris." *Science* **124**, 474-477, 1956.
- [10] Breslin, A. J., Cassidy, M. E., 1955. Radioactive Debris from Operation Castle, Islands of the Mid-pacific.

- NYO-4623, US Atomic Energy Commission.
- [11] Bouville, André, Harold L. Beck, and Steven L. Simon. "Doses from external irradiation to Marshall Islanders from Bikini and Enewetak nuclear weapons tests." *Health physics* **99**(2), 143–156, 2010.
- [12] Eisenbud, M., Harley, J., 1956, Radioactive Fallout through September 1955. *Science*, **124**, 251–255.
- [13] 大塚巖, 1984. 私におけるビキニ事件, Isotope News, 1984年3月号, p.21.
- [14] Beck, H. L., Bouville, A., Moroz, B. E., Simon, S. L., 2010. Fallout Deposition in the Marshall Islands from Bikini and Enewetak Nuclear Weapons Tests. *Health Phys.* **99**(2), 124–142.
- [15] Norment, H. G., 1981. DNAF-1: An Analytical Fallout Prediction Model and Code. DNA 6168F, Defense Nuclear Agency.
- [16] Hicks, H. G. Results of calculations of external gamma radiation exposure rates from local fallout and the related radionuclide compositions of selected U. S. Pacific events. No. UCRL-53505, Lawrence Livermore National Laboratory, CA(USA), 1984.
- [17] Folsom, T. R., Werner, L. B., 1959, Distribution of Radioactive Fallout by Survey and Analyses of Sea Water, WT-935(EX).
- [18] Eckerman, K. F., Leggett, R. W., Available at <https://www.epa.gov/radiation/tools-calculating-radiation-dose-and-risk#tab-3>
- [19] Glasstone, Samuel, and Philip J. Dolan. *Effects of nuclear weapons*. Department of Defense, Washington, DC (USA); Department of Energy, Washington, DC (USA), 1977.
- [20] ICRP, 1996. Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection Against External Radiation. ICRP Publication 74, *Ann. ICRP* **26**(3/4).
- [21] R. J. List, "On the transport of atomic debris in the atmosphere." *J. Air Pollut. Control Assoc.* **5**(3), 474–477 (1956).
- [22] Kim, C. H., Reece, W. D., and Poston Sr, J. W., 1998, Effective Dose Equivalent and Effective Dose for Photon Exposures From Point and Disk Sources on the Floor. *Health Phys.* **75**(2), 170–178.
- [23] 山崎文男, 笥弘毅. 1954. 第五福龍丸の乗組員はどれだけ放射線をうけたか. *RADIOISOTOPES*, **3**(1), 4–6.
- [24] 三好和夫, 熊取敏之. 1964. ビキニ放射線症の臨床並びに血液学的特徴 (被曝後9年間の経過を含めて), 日本血液学全書, 3, 660–703.
- [25] 高知県, ビキニ環礁水爆実験の健康影響に関する健康等相談会 講演集, <http://www.pref.kochi.lg.jp/soshiki/130401/2016022400368.html>
- また, 距離及び方位の計算は, 以下の国土地理院の測量計算サイトを利用した。
<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/surveycalc/bl2stf.html>

表2 各環礁・島嶼における外部被ばくによる線量（単位：mR）（文献[10]）

モニタリング方法	環礁・島嶼名	実験名	ブラボー	ロメオ	クーン	ユニオン	ヤンキー	ネクター
		線量積分区間 (実験間の日数)	3/1-3/26 (26)	3/27-4/6 (11)	4/7-4/25 (19)	4/26-5/4 (9)	5/5-5/13 (9)	5/14-5/23 (10)
航空機	ラエ環礁	Lae	5.5	12	12	7.5	78	9.5
	ウジャエ環礁	Ujae	6	32	17	9.5	48	1.4
	オト環礁	Wotho	250	270	110	55	95	4
	アイリングナ環礁	Ailinginae	60,000	3,400	3,300	8	600	70
	ロンゲラップ環礁	Rongelap	180,000	11,000	6,000	3,400	1,700	300
	ロンゲリック環礁	Rongerik	190,000	9,000	5,000	550	1,400	280
	タオンギ環礁	Taongi	280	60	9.5	10	10	
	ビカル環礁	Bikar	60,000	3,000	1,200	650	1,700	150
	ウチリック環礁	Utirik	22,000	1,200	700	100	330	50
	タカ環礁	Taka	15,000	800	1,000	120	380	50
	アイルック環礁	Ailuk	5,000	410	110	100	500	20
	ジェモ島	Jemo	1,200	410	130	18	200	20
	リキエップ環礁	Likiep	1,700	170	80	30	200	16
	ナム環礁	Namu	1.8	90	100	0	25	0
	アイリングラップ環礁	Ailinglaplap	7.2	140	100	8	0	0
	ナモリック環礁	Namorik	20	160	70	2	0	0
	エボン環礁	Ebon	20	250	50	8	25	0
	キリ島	Kili	20	200	70	0	0	1.3
	ジャルト環礁	Jaluit	20	300	70	8	0	2.6
	ミリ環礁	Mili	60	160	200	20	0	1.3
	アルノ環礁	Arno	60	200	300	8	25	1.3
	マジュロ環礁	Majuro	200	200	50	20	0	1.3
	オール環礁	Aur	40	200	50	8	40	2.6
	マロエラップ環礁	Malgolap	350	120	50	0	25	4.0
	エリカブ環礁	Erikub	390	200	50	0	0	6.5
	ウォッジェ環礁	Wotje	1,800	300	200	13	220	10
地上局	クエゼリン環礁	Kwajalein	150	480	250	12	320	17
	マジュロ環礁	Majuro	156	137	53	2	2	0.7
	クサイ島	Kusaie	85	4.2	0.7	0.2	0.5	0.1
	ポナベ島	Ponape	5.5	20	31	21	38	6.2
	トラック諸島	Truk	29.1	1.3	2.3	0.9	15.1	
	ヤップ島	Yap				8.7	4.7	4.6
	イオージマ	Iwo Jima				6.8	12.7	2.0
	ウジェラング環礁	Ujelang	85.4		176	52	142	
	ウエーク島	Wake	3.3	1.9	3.0	2.2	1.2	0.7
ジョンストン島	Johnston	110	28	66				

表3 冪指数を変化させて対流圏放射性降下物による¹³⁷Cs沈着密度を計算した場合の
ウェーク島，ジョンストン島，カントン島及びトラック諸島の線量

単位：mR（文献[12]ではmrad）

線量積分時間：爆発後50年間（文献[12]では無限）

島名	核実験	冪指数					文献[12]
		-1.1~-1.4	-2	-2.5	-3	-3.5	
ウェーク (北)	ブラボー	19	13	9.5	7.1	5.3	—
	ロメオ	9.0	5.6	4.2	3.2	2.4	—
	クーン	1.8	1.2	1.0	0.7	0.6	—
	ユニオン	1.2	0.8	0.6	0.4	0.3	—
	ヤンキー	1.7	1.1	0.8	0.6	0.5	—
	合計	33	22	16	12	9.0	13
ジョンス トン (東北東)	ブラボー	570	110	44	18	7	—
	ロメオ	310	99	41	17	7	—
	クーン	340	73	31	13	6	—
	ユニオン	140	29	12	5	2	—
	ヤンキー	450	88	36	15	6	—
	合計	1,810	399	164	68	28	28
カントン (東南東)	ブラボー	120	25	10	4	1	—
	ロメオ	59	14	6	2	1	—
	クーン	30	6	2	1	0	—
	ユニオン	5	1	1	0	0	—
	ヤンキー	62	13	5	2	1	—
	合計	276	59	24	9	4	19
トラック (西南西)	ブラボー	94	30	17	9	5	—
	ロメオ	150	60	33	18	10	—
	クーン	46	20	11	6	4	—
	ユニオン	120	40	22	12	7	—
	ヤンキー	120	38	21	11	6	—
	合計	530	188	104	56	31	47

注：西南西のトラック諸島については，図3~4に実線で示した補間値ではなく，同じ方位にあるウジェラング環礁（247度，約520km）の¹³⁷Cs沈着密度と到着時間を計算の始点とした。

表 4 各漁船の放射性降下物遭遇時の座標, 距離, 経過時間, ¹³⁷Cs 沈着密度及び外部被ばくによる線量

船名	核実験	局地放射性降下物						対流圏放射性降下物						照射線量 (合計) (mR)	実効線量 (合計) (mSv)	積分 期間 (迄)
		北緯	東経	距離	経過 時間	¹³⁷ Cs (船上)	照射線量	北緯	東経	距離	経過 時間	¹³⁷ Cs (船上)	照射線量			
		(度)	(度)	(km)	(h)	(Bq/m ²)	(mR)	(度)	(度)	(km)	(h)	(Bq/m ²)	(mR)			
第13光栄丸	ブラボー	10.0	179	1,500	50	84	51	9.8	178	1,500	70	130	67	118	0.84	3/26
第7大丸	ブラボー	9.6	179	1,500	50	27	18	9.2	179	1,600	76	100	53	71	0.51	4/1
第11高知丸	ブラボー							14.8	170	610	39	360	282	282	2.02	4/16
	ロメオ							9.1	175	1,100	170	100	25	25	0.18	
第2幸成丸	ブラボー							18.0	167	720	120	13	6	6	0.04	4/15
	ロメオ							10.8	177	1,300	160	180	43	43	0.31	
第5海福丸	ブラボー															4/6
	ロメオ															
第5明賀丸	ロメオ							9.4	178	1,400	180	77	23	23	0.16	4/25
	クーン							9.3	178	1,400	67	56	26	26	0.19	
第8順光丸	クーン							15.1	-176	2,000	100	40	20	20	0.14	5/18
	ユニオン							9.9	-171	2,600	170	8	2	2	0.01	
	ヤンキー							17.3	179	1,600	75	15	6	6	0.04	

注：距離, 経過時間及び ¹³⁷Cs 沈着密度の有効数字は 2 桁とした。ただし, 照射線量については, 局地放射性降下物と対流圏放射性降下物による寄与の合計の計算を分かりやすくするため最小単位 1 mR で表記した。実効線量への換算は, 本文中に記述した手順による。

表 5 ブラボー実験によって汚染された海水を用いる
入浴による外部被ばく線量 (第 11 高知丸)

現地時刻	実効線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	実効線量* (μSv)
1954/3/3 18:00	1.3E-01	4.4E-02
1954/3/4 18:00	2.6E-01	8.5E-02
1954/3/5 18:00	9.1E-02	3.0E-02
1954/3/6 18:00	2.5E-02	8.5E-03
1954/3/7 18:00	2.0E-02	6.8E-03
1954/3/8 18:00	1.6E-02	5.2E-03
1954/3/9 18:00	1.6E-02	5.2E-03
1954/3/10 18:00	1.2E-02	4.1E-03
1954/3/11 18:00	9.9E-03	3.3E-03
1954/3/12 18:00	8.4E-03	2.8E-03
1954/3/13 18:00	7.9E-03	2.6E-03
1954/3/14 18:00	7.4E-03	2.5E-03
1954/3/15 18:00	6.9E-03	2.3E-03
1954/3/16 18:00	7.2E-03	2.4E-03
1954/3/17 18:00	7.7E-03	2.6E-03
1954/3/18 18:00	8.1E-03	2.7E-03
1954/3/19 18:00	9.0E-03	3.0E-03
1954/3/20 18:00	7.0E-03	2.3E-03
1954/3/21 18:00	6.8E-03	2.3E-03
1954/3/22 18:00	5.8E-03	1.9E-03
1954/3/23 18:00	5.7E-03	1.9E-03
1954/3/24 18:00	5.5E-03	1.8E-03
1954/3/25 18:00	5.0E-03	1.7E-03
1954/3/26 18:00	4.1E-03	1.4E-03
....
合計		2.4E-01

* 20 分間の入浴を仮定

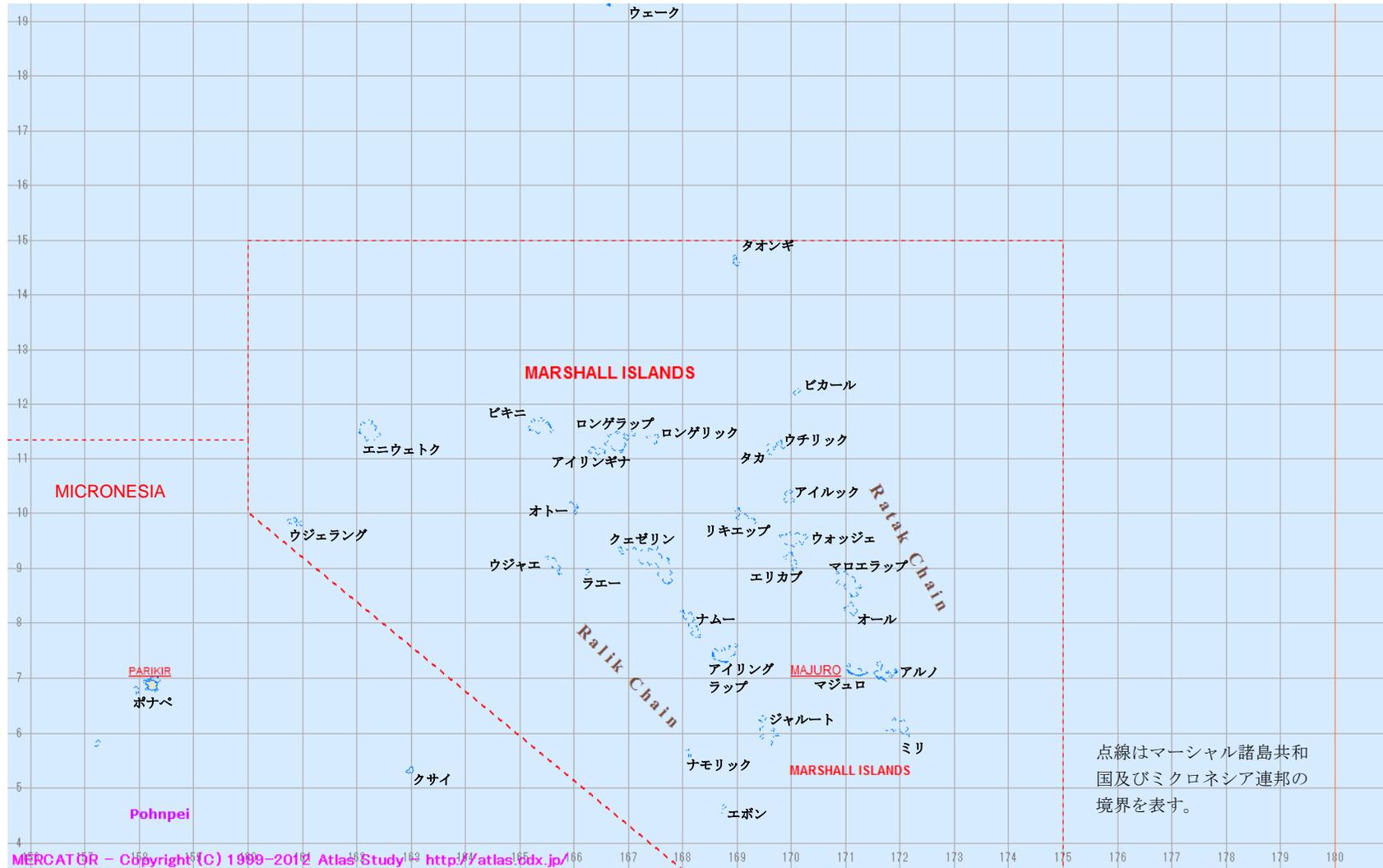


図1 マーシャル諸島及びその近海地図（経緯度線の間隔は約 110 km に相当する）

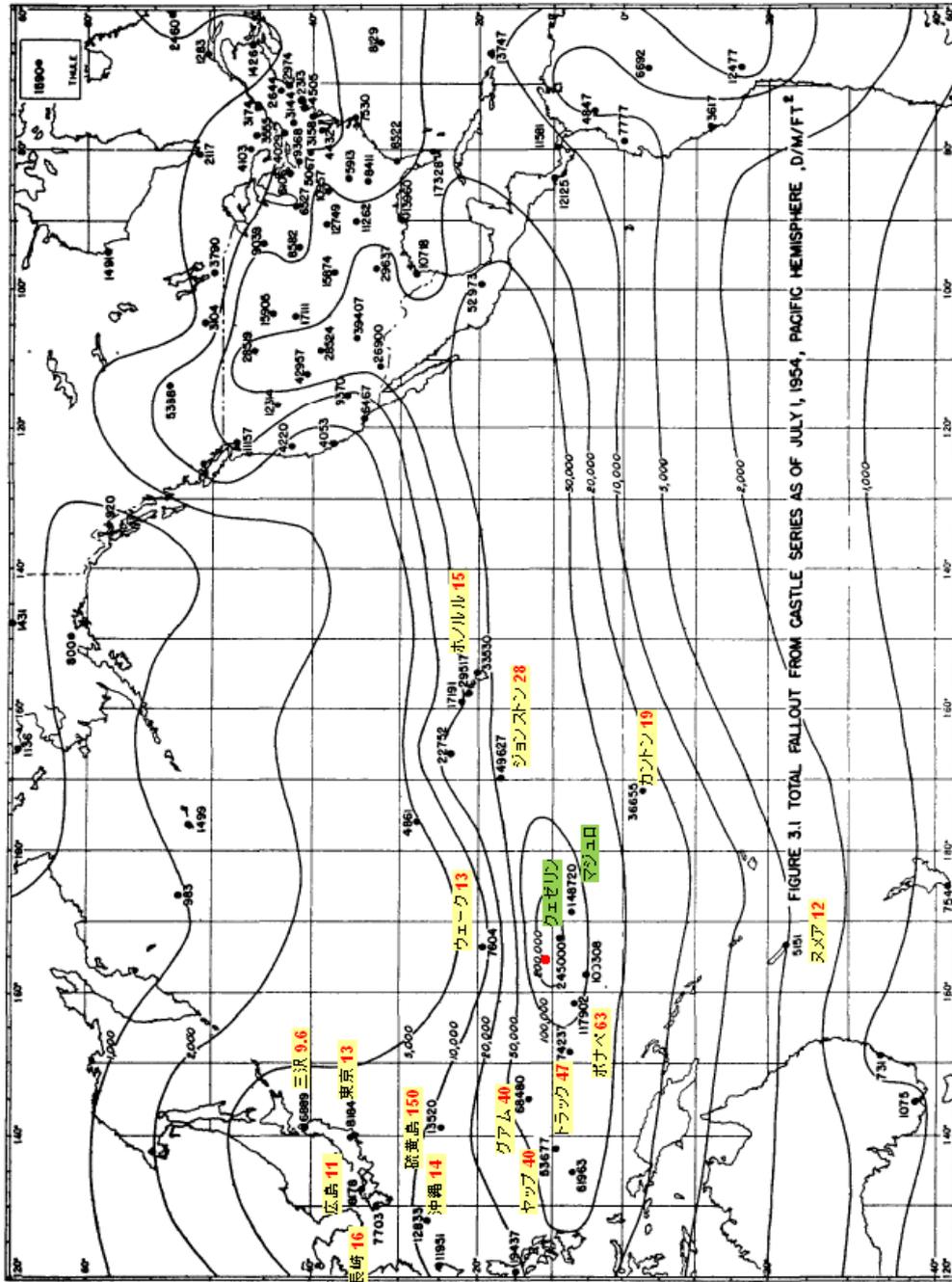


図2 世界各地で粘着紙によって観測された1954年7月1日時点での放射性降下物の合計
 (単位: dpm/ft²) (文献[8]の図3.1) と、その観測値に基づき算出された外部被ばくによる
 線量 (単位: mrad) [12]

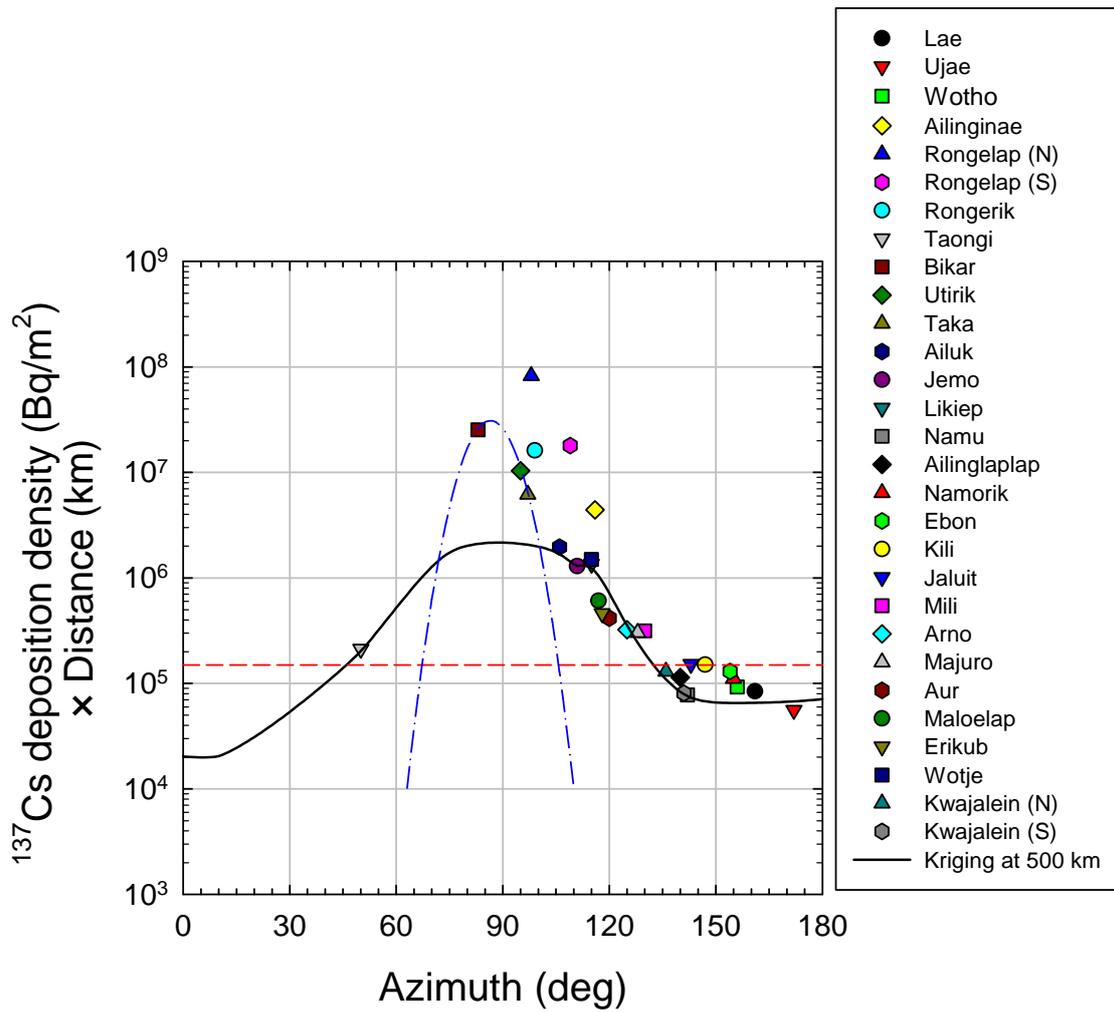


図3 ブラボー実験における ^{137}Cs 沈着密度の方位別分布傾向

実線は、距離 500 km、方位 0 度（北）～180 度（南）において、補間によって算出した対流圏放射性降下物による ^{137}Cs 沈着密度である。赤破線は、厚労科研報告書での計算モデル（方位に関係なく距離 500 km で 300 Bq/m^2 ）である。一方、青破線は、計算によって算出した距離 500 km における局地放射性降下物による ^{137}Cs 沈着密度である。

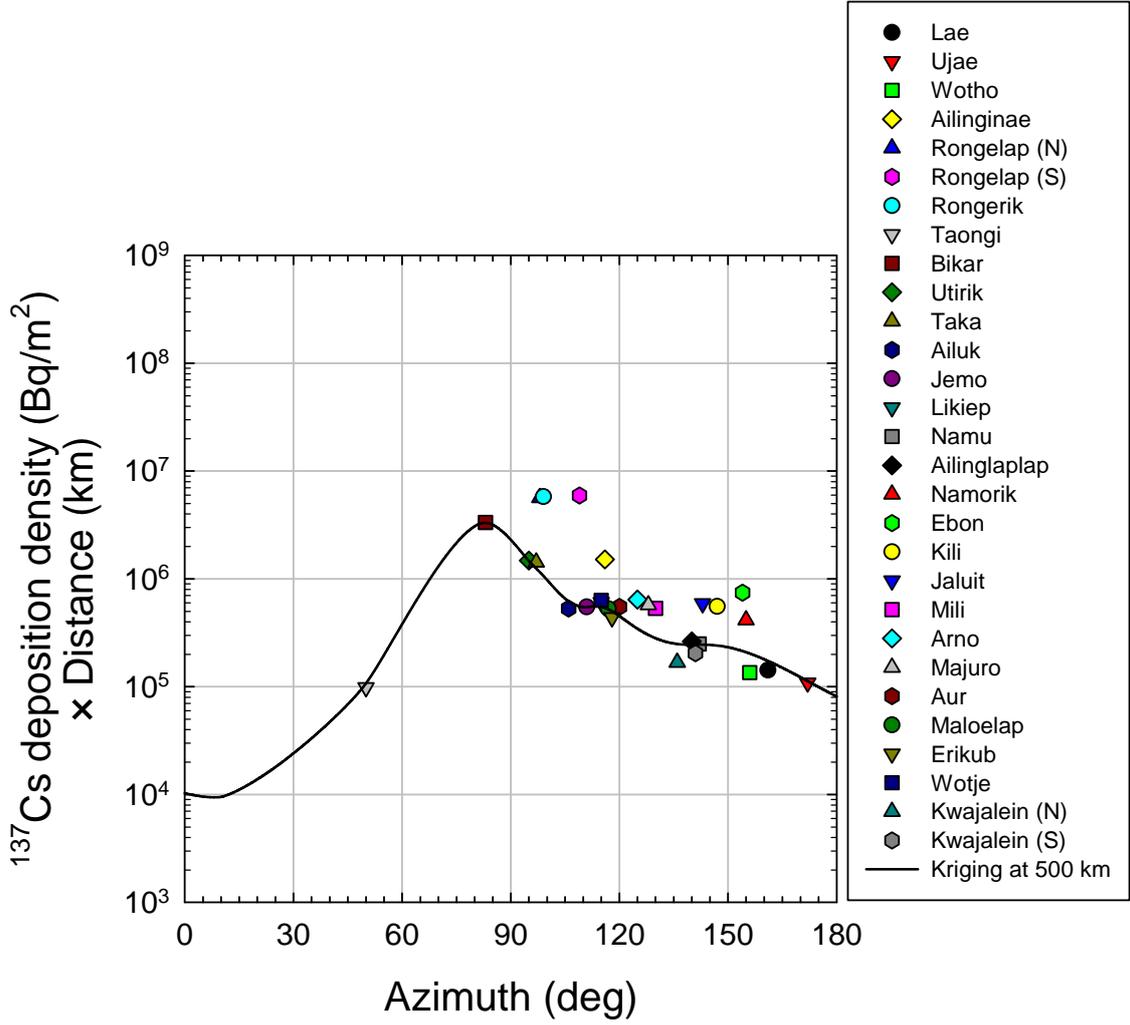


図 4 ロメオ実験における ^{137}Cs 沈着密度の方角別分布傾向

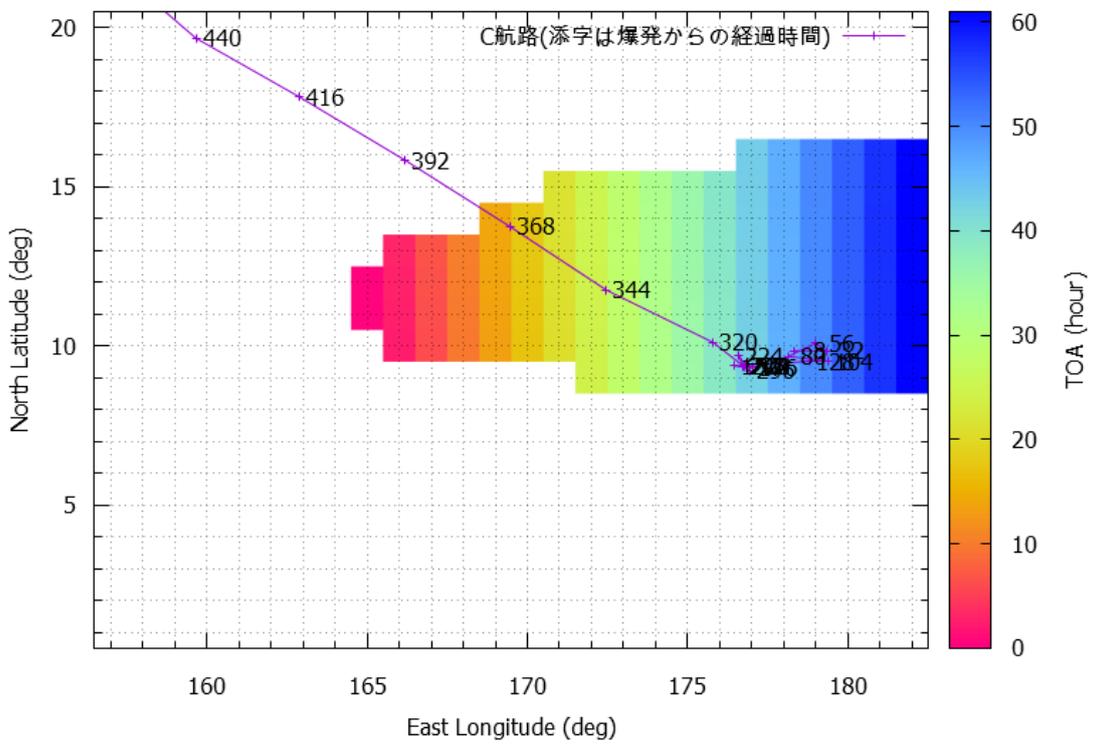
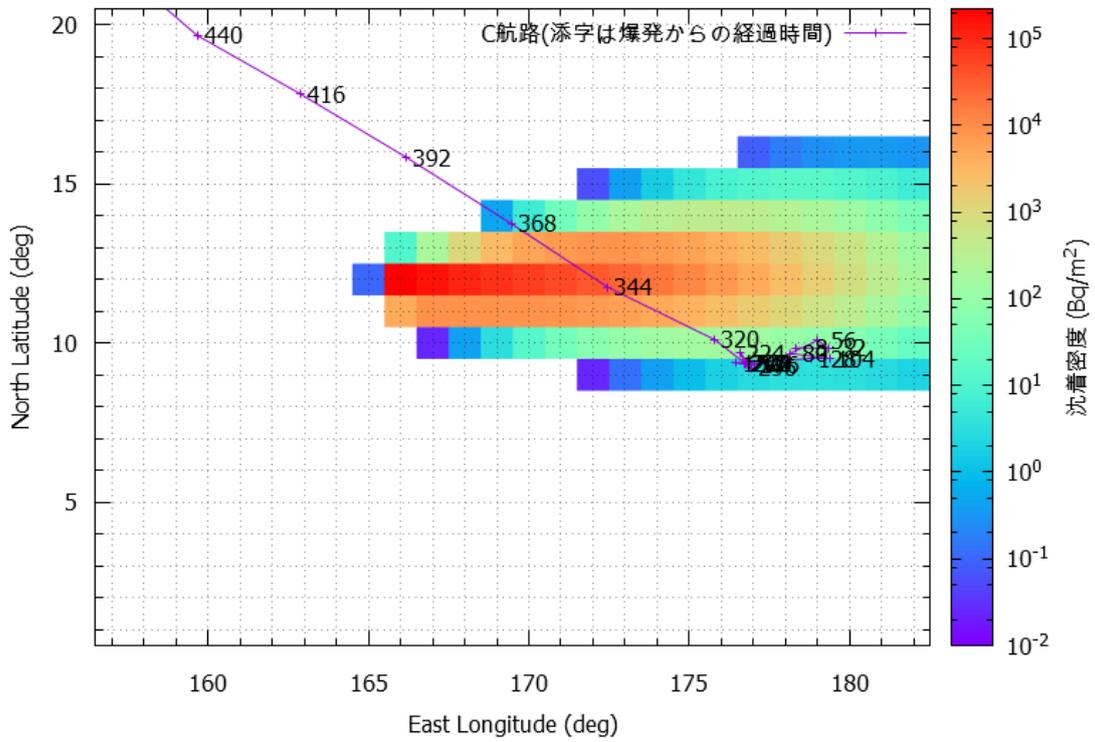


図 5(a) ブラボー実験における局地放射性降下物成分の ^{137}Cs 沈着密度及び到着時間 (TOA) と第 13 光栄丸の航路

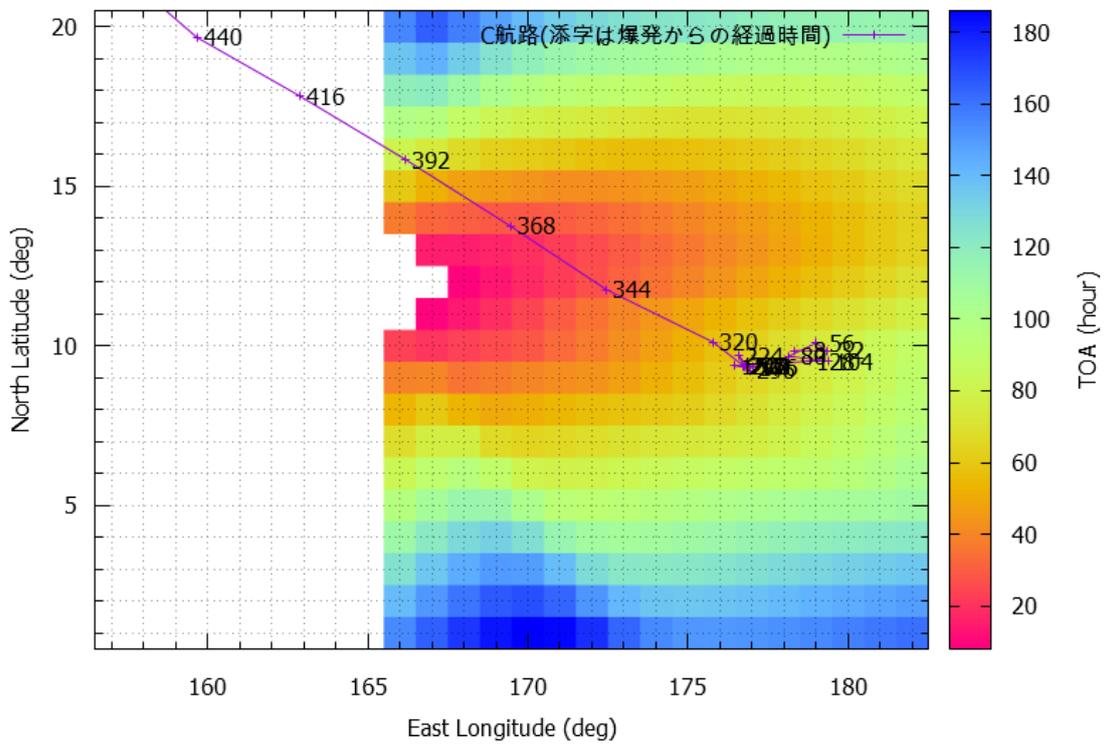
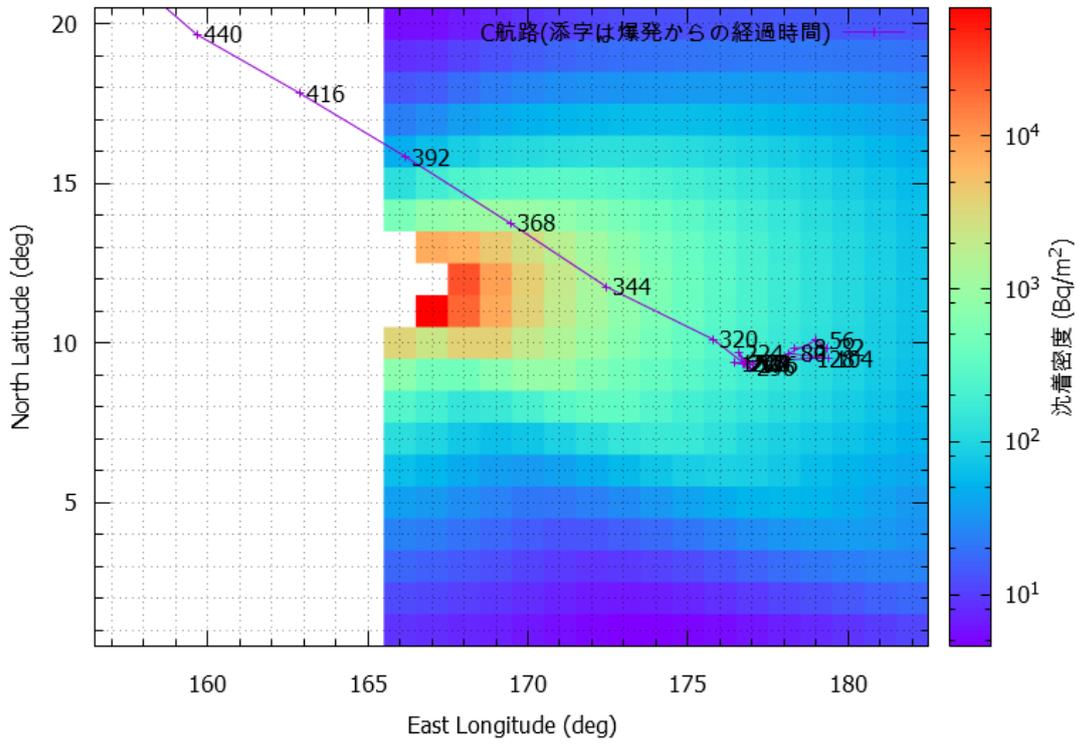


図 5(b) ブラボー実験における対流圏放射性降下物成分の ^{137}Cs 沈着密度及び到着時間 (TOA) と第 13 光栄丸の航路

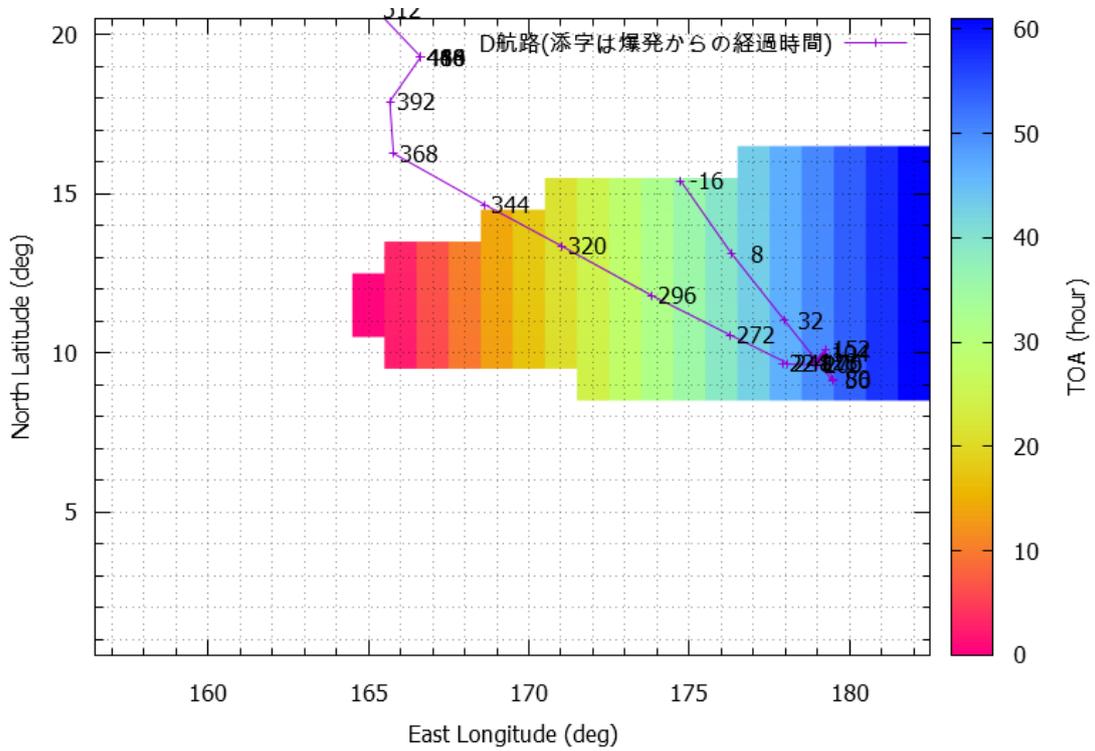
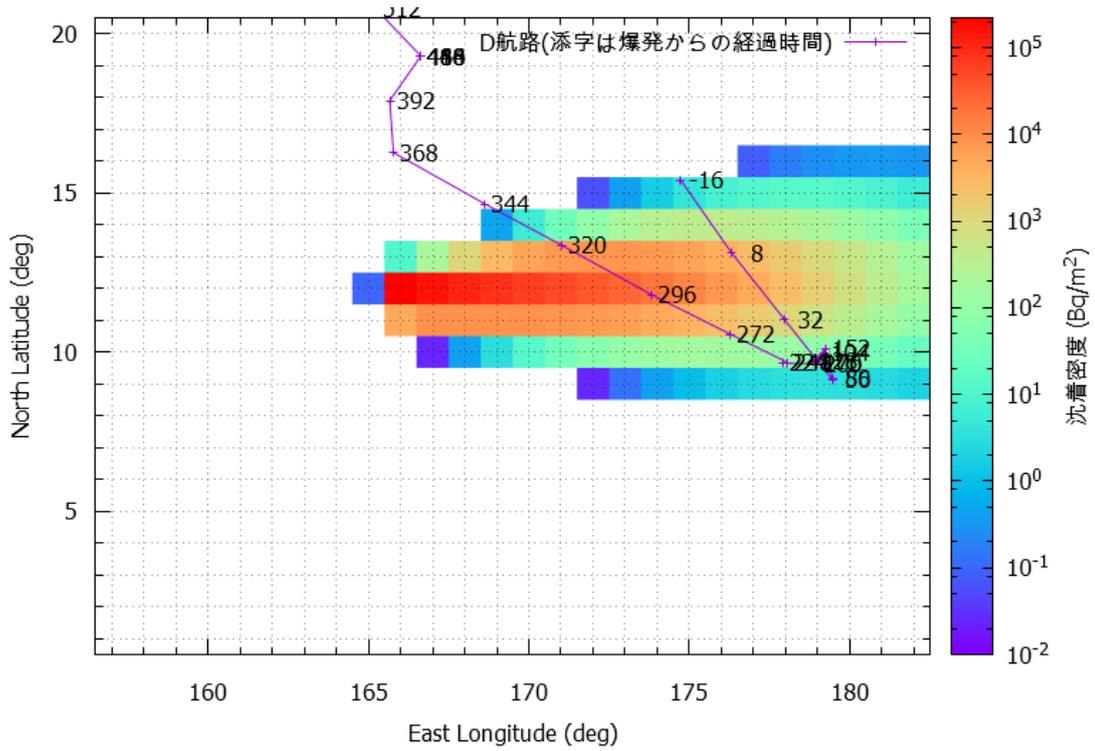


図 6(a) ブラボー実験における局地放射性降下物成分の ^{137}Cs 沈着密度及び到着時間 (TOA) と第 7 大丸の航路

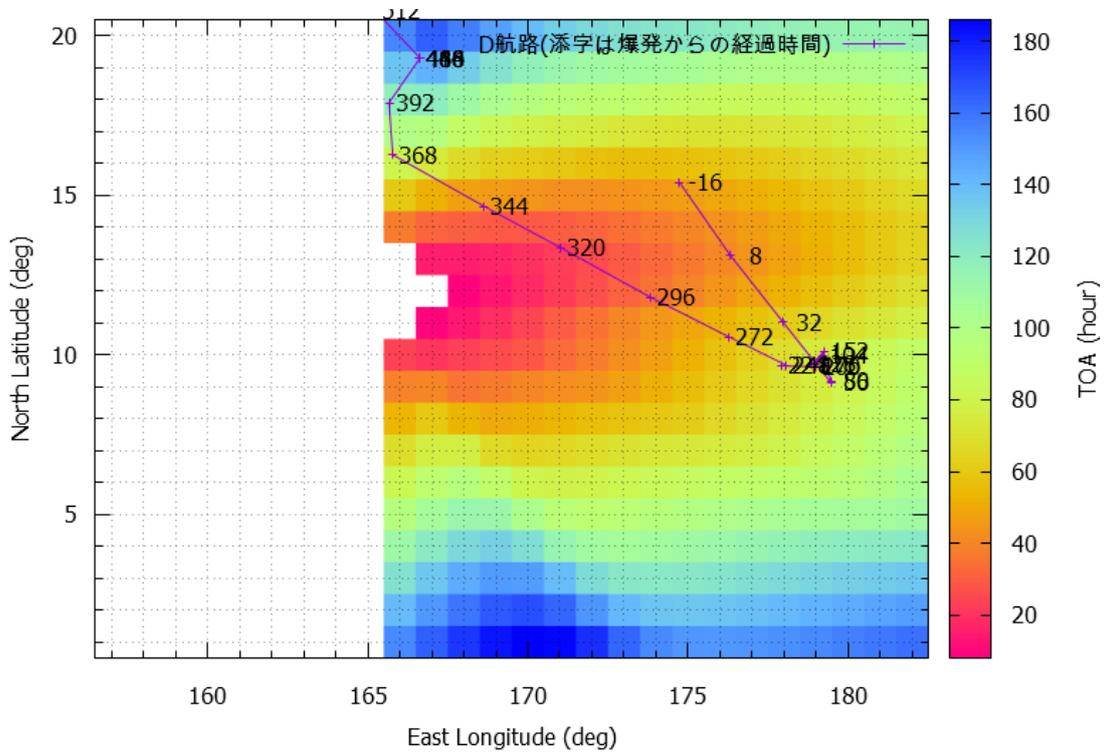
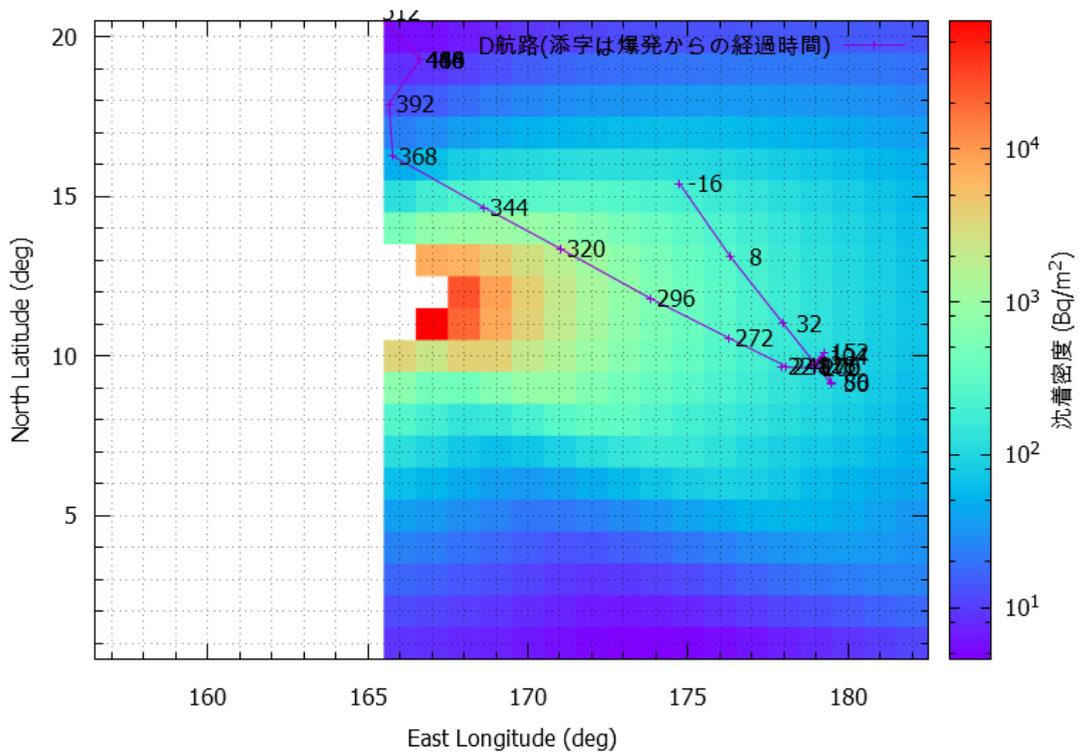


図 6(b) ブラボー実験における対流圏放射性降下物成分の ^{137}Cs 沈着密度及び到着時間 (TOA) と第 7 大丸の航路

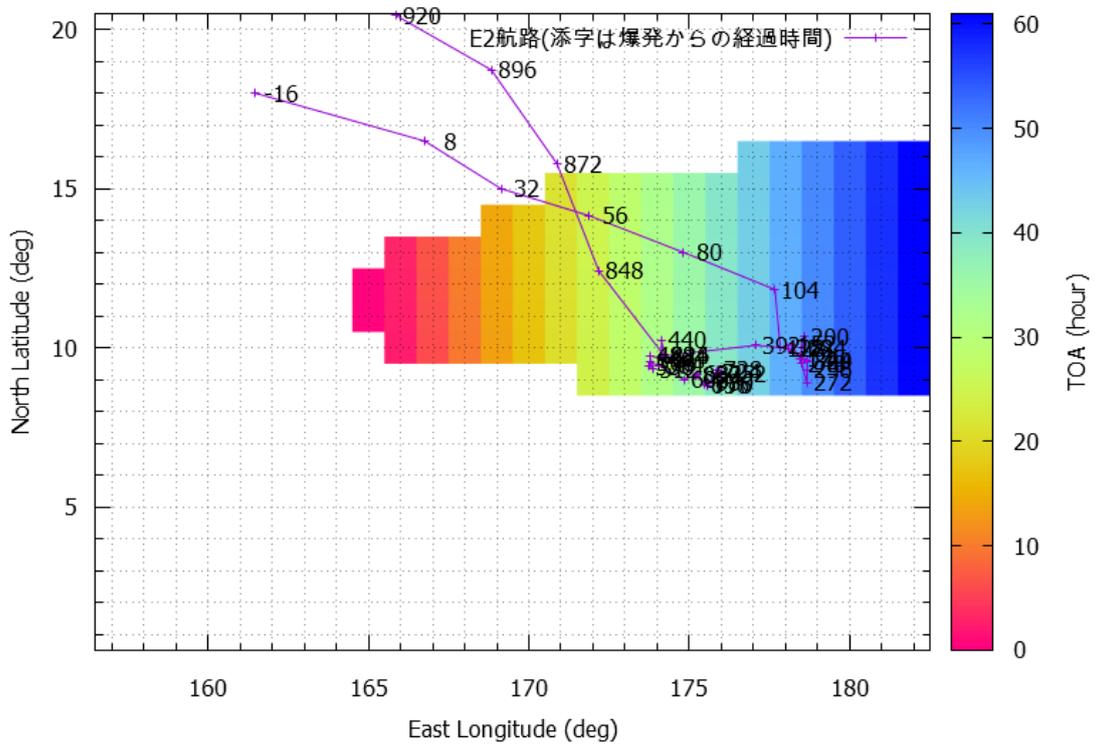
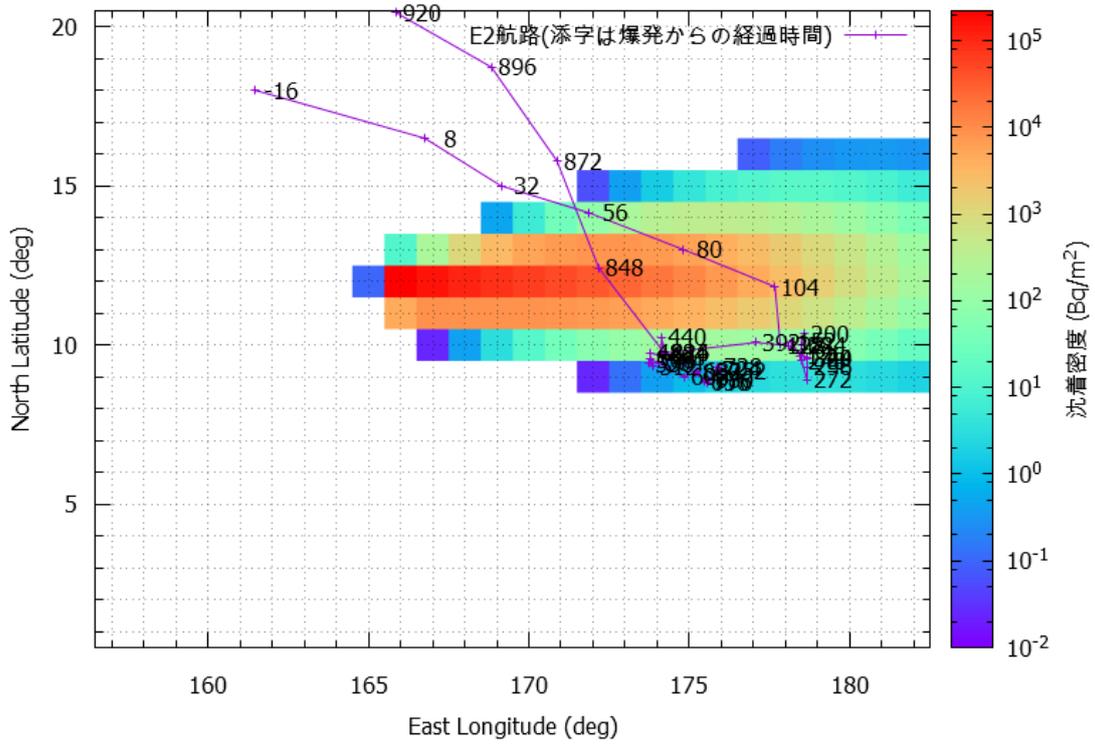


図 7(a) ブラボー実験における局地放射性降下物成分の ^{137}Cs 沈着密度及び到着時間 (TOA) と第 11 高知丸の航路

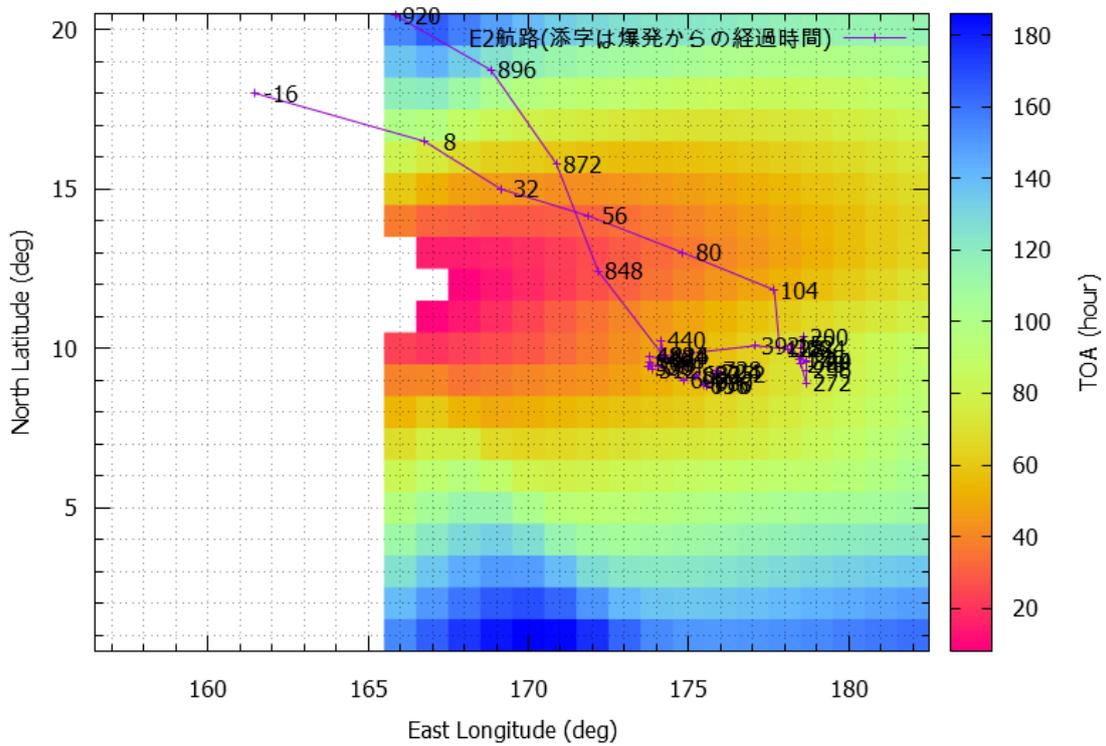
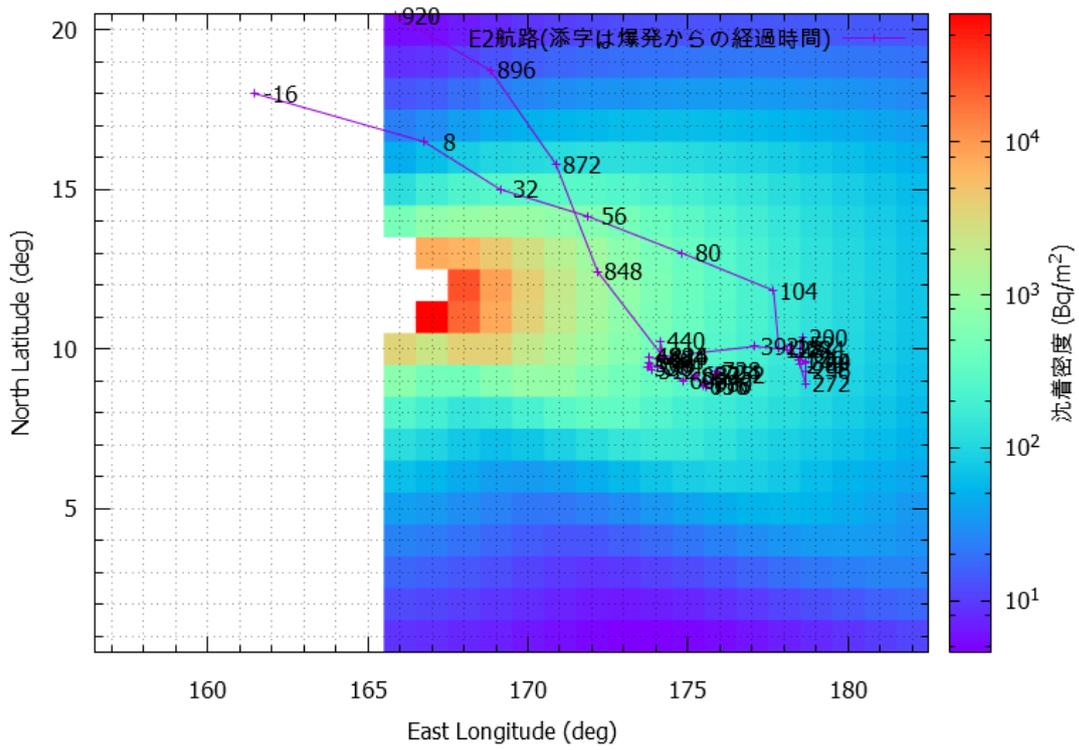


図 7(b) ブラボー実験における対流圏放射性降下物成分の ^{137}Cs 沈着密度及び到着時間 (TOA) と第 11 高知丸の航路

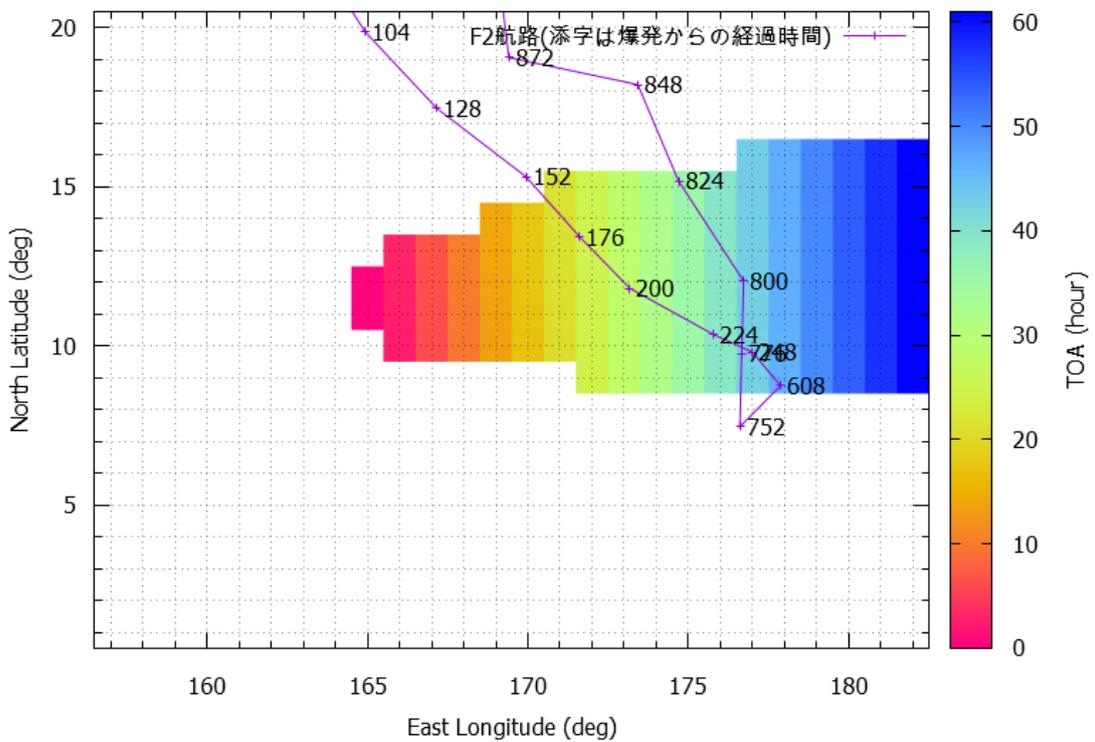
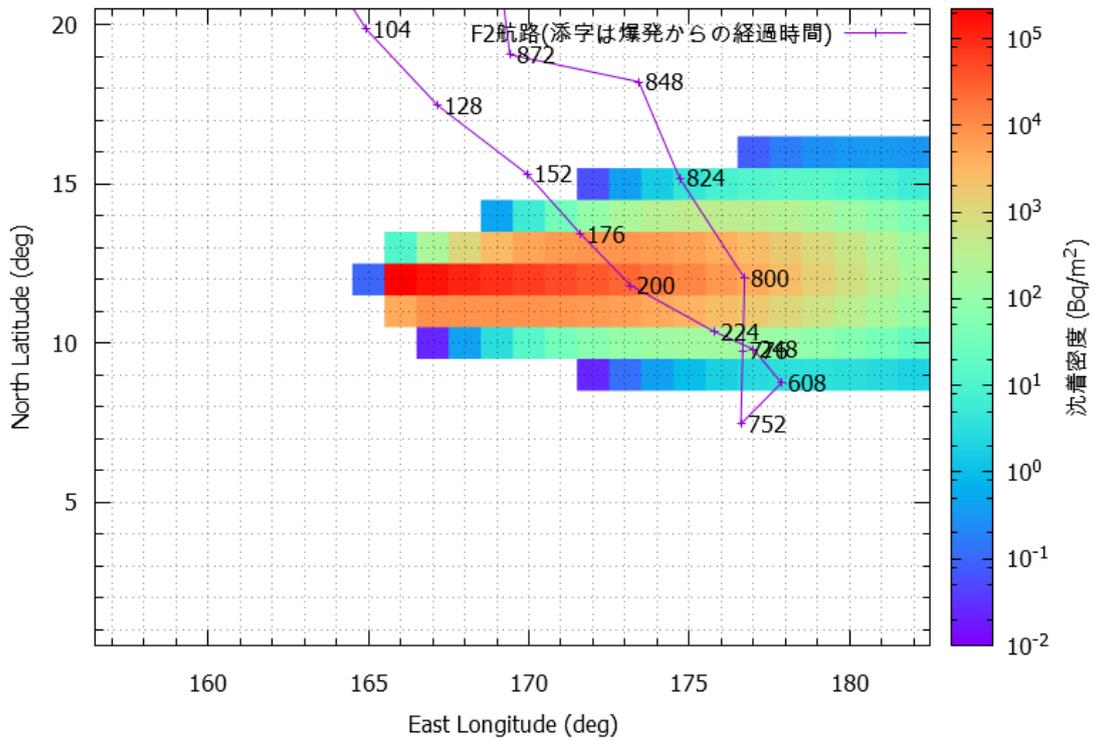


図 9(a) ブラボー実験における局地放射性降下物成分の ^{137}Cs 沈着密度及び到着時間 (TOA) と第 2 幸成丸の航路

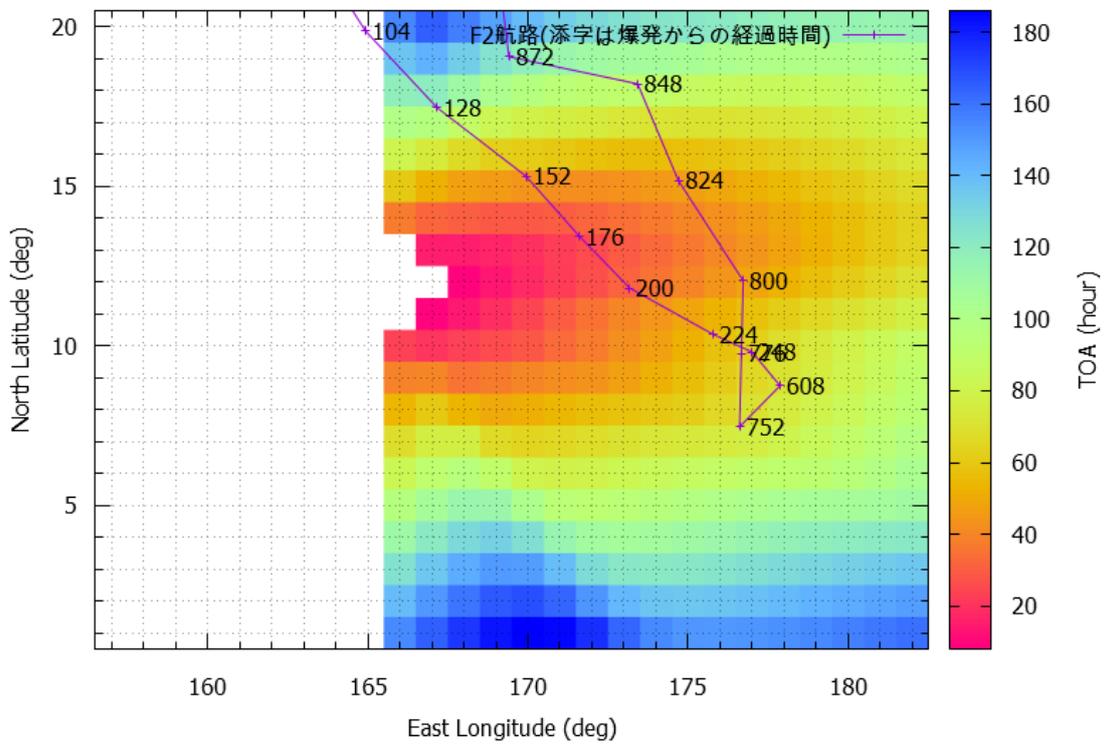
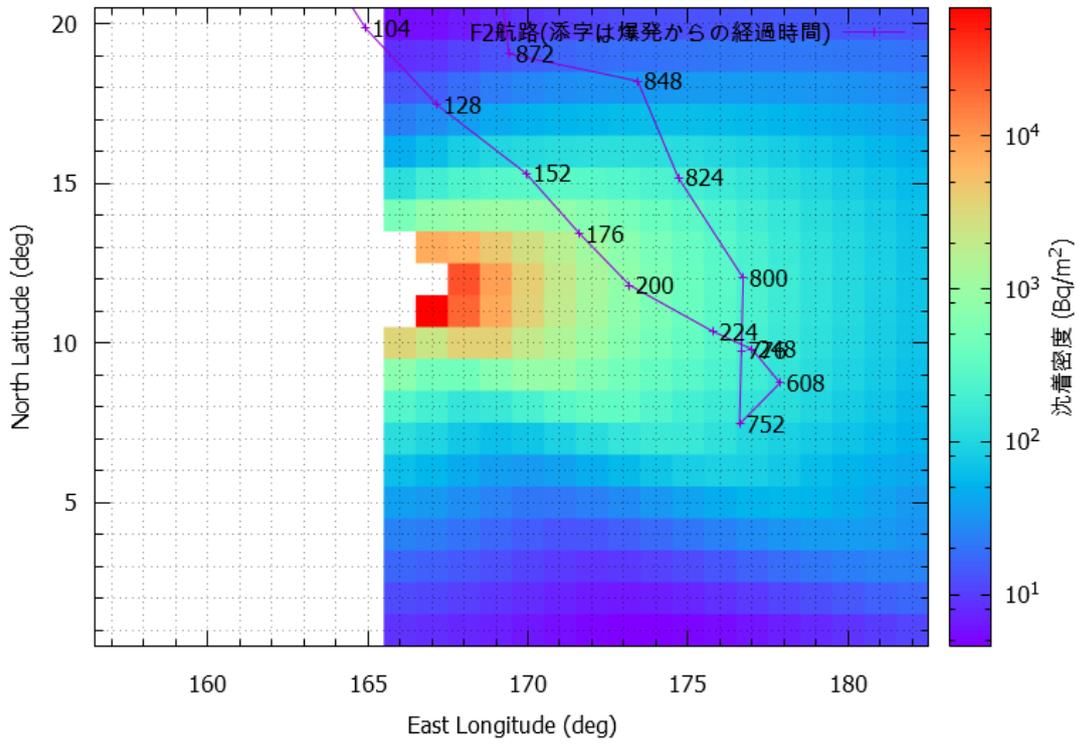


図 9(b) ブラボー実験における対流圏放射性降下物成分の ^{137}Cs 沈着密度及び到着時間 (TOA) と第 2 幸成丸の航路

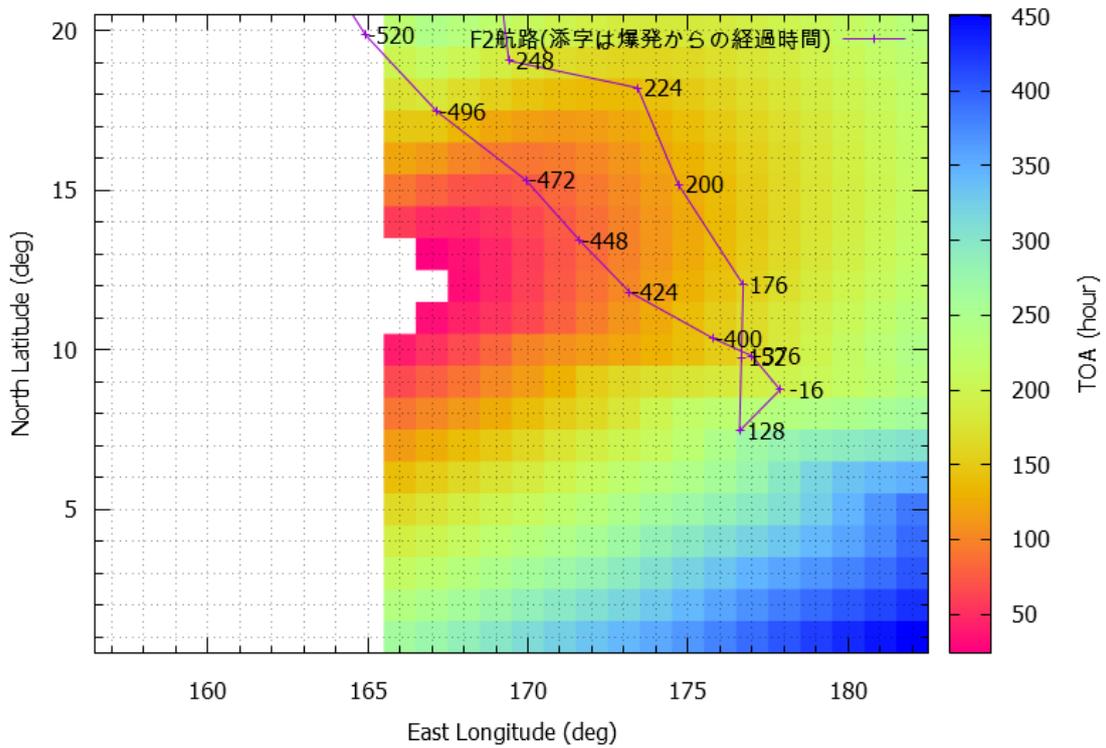
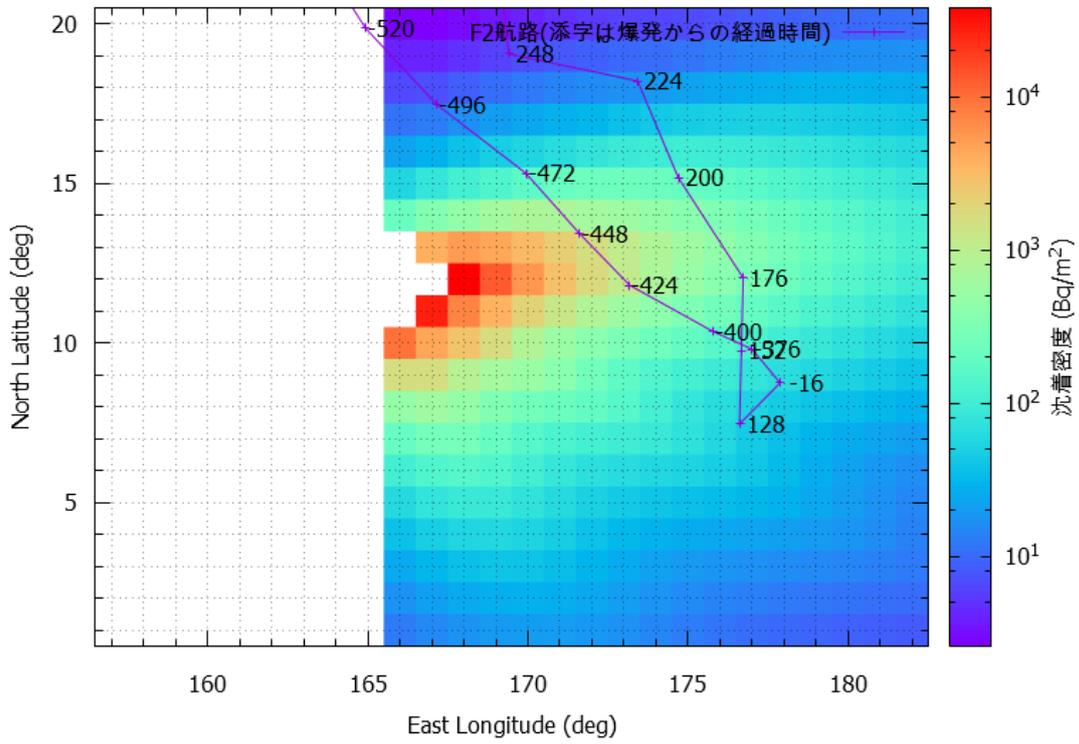


図 10 ロメオ実験における対流圏放射性降下物成分の ^{137}Cs 沈着密度及び到着時間 (TOA) と第 2 幸成丸の航路

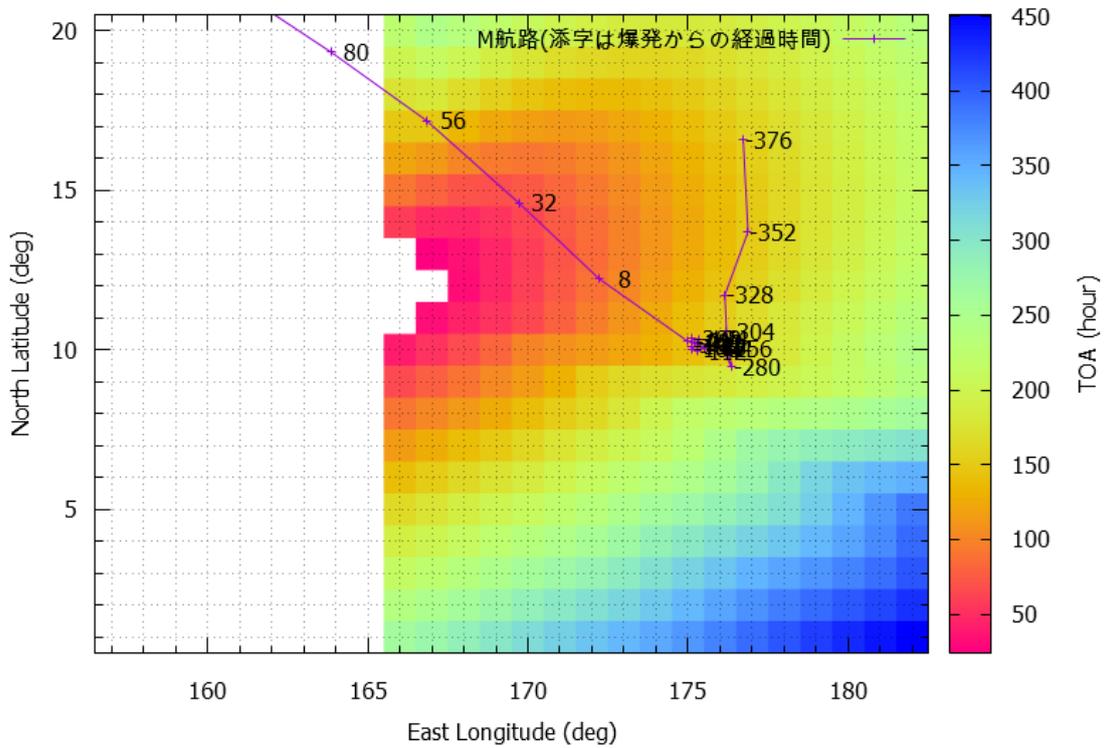
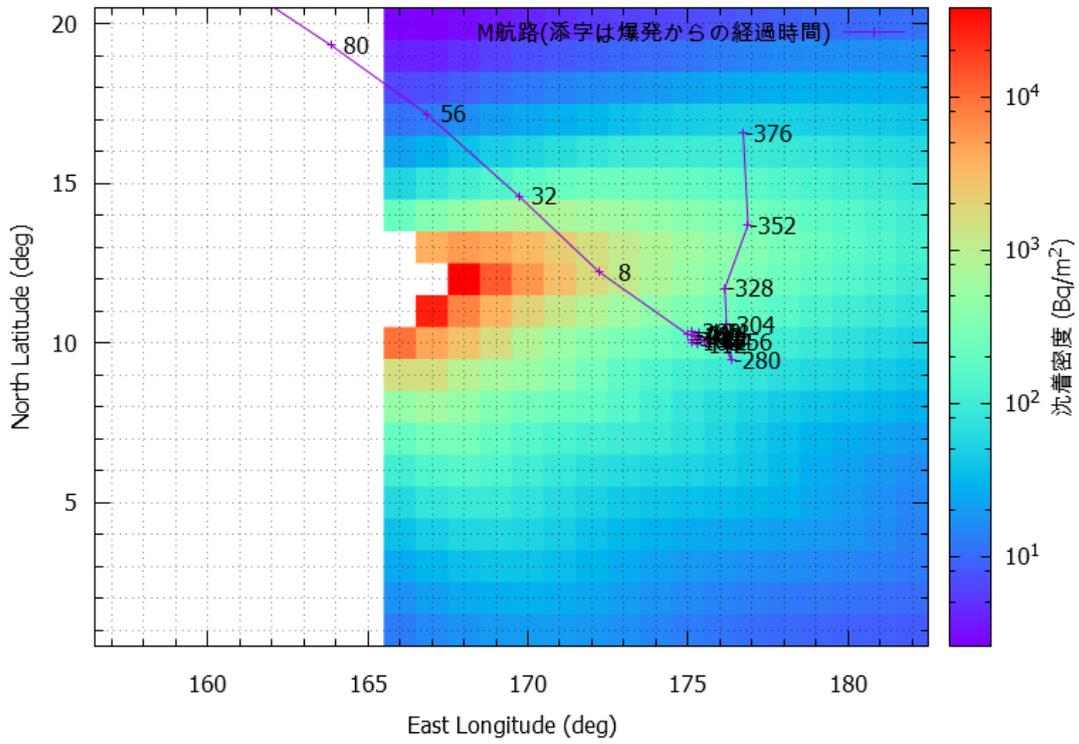


図 11 ロメオ実験における対流圏放射性降下物成分の ^{137}Cs 沈着密度及び到着時間 (TOA) と第 5 海福丸の航路

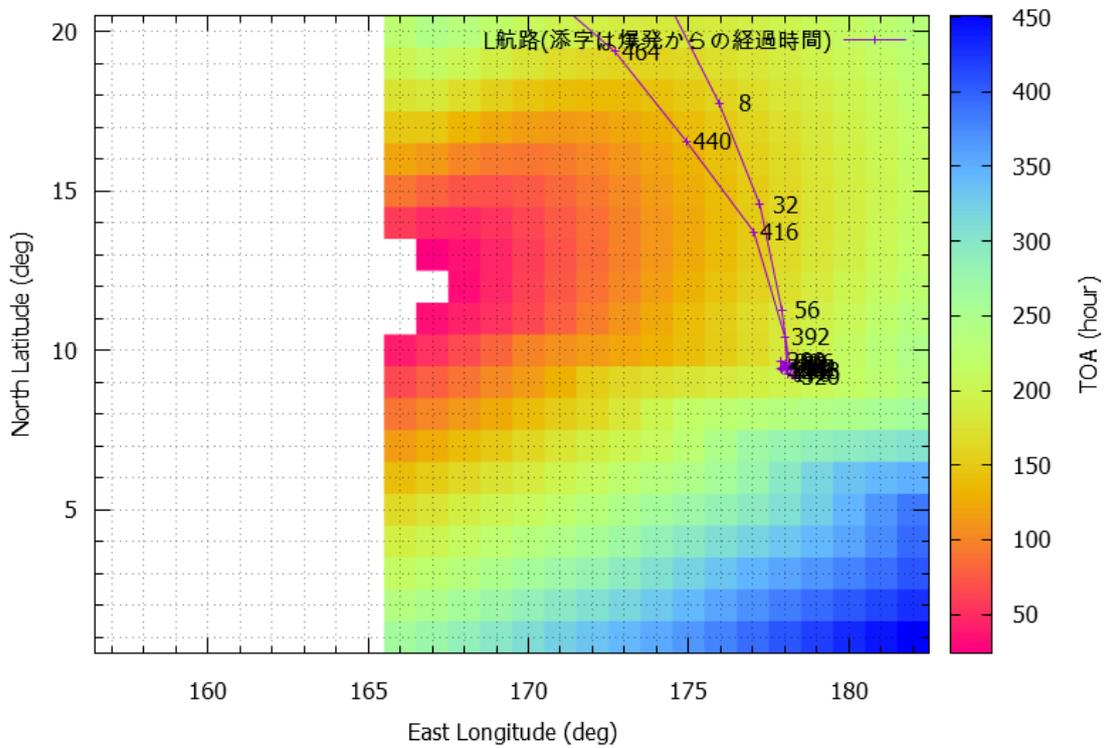
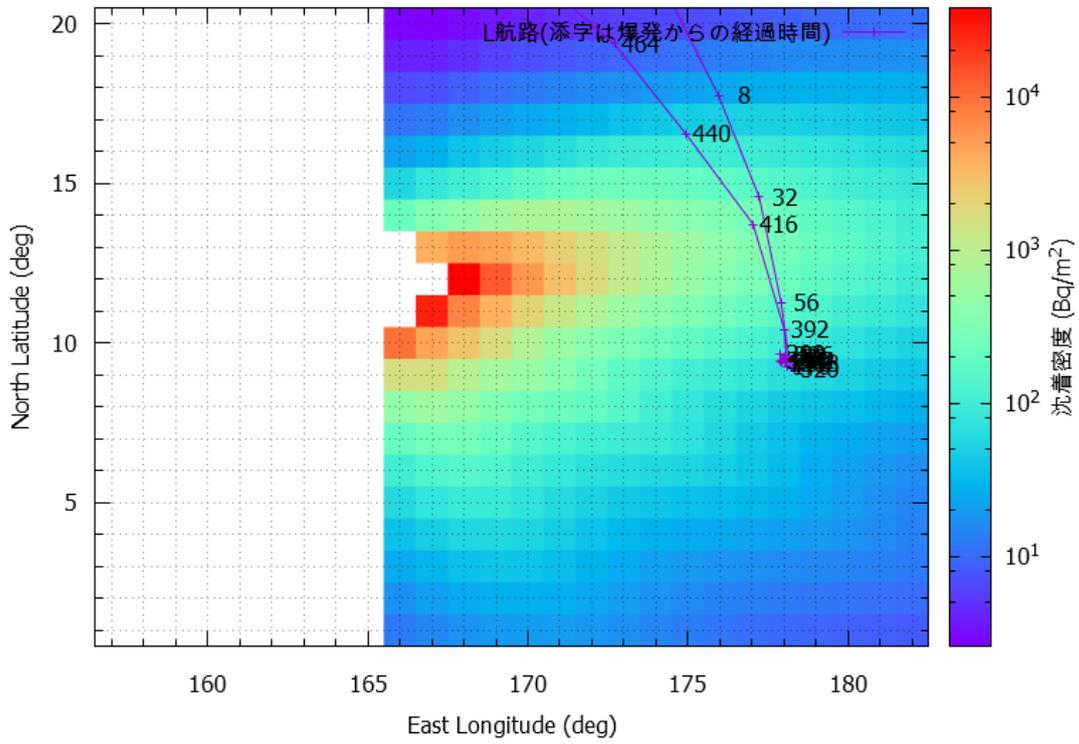


図 12 ロメオ実験における対流圏放射性降下物成分の ^{137}Cs 沈着密度及び到着時間 (TOA) と第 5 明賀丸の航路

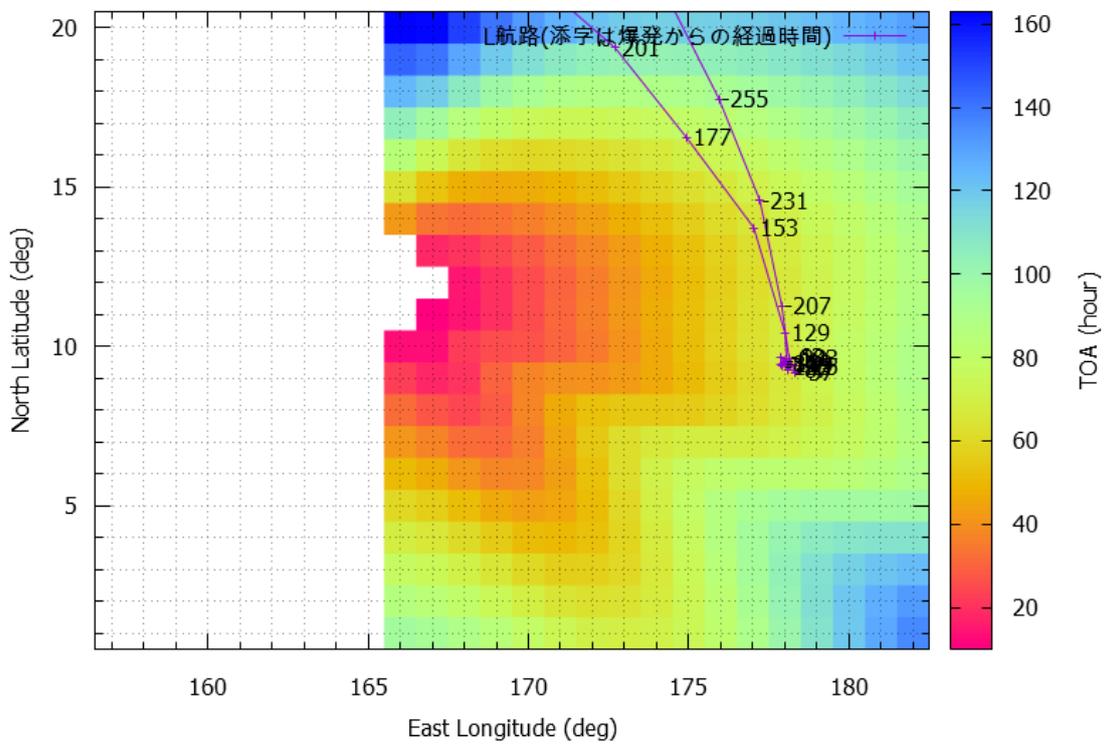
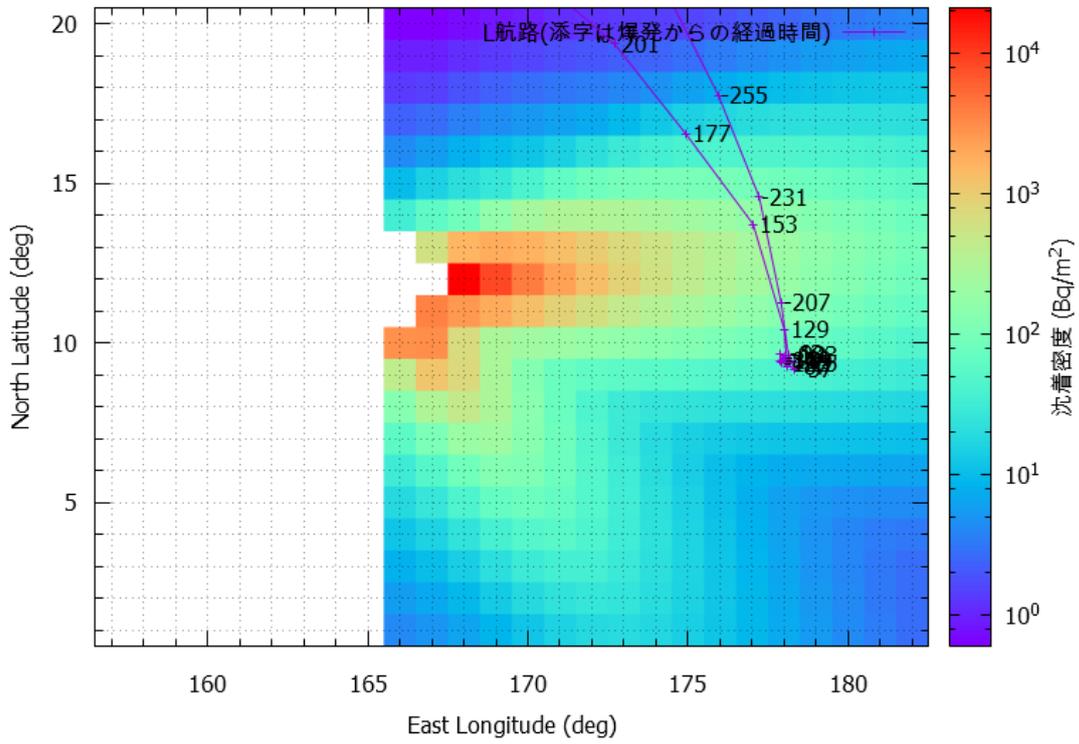


図 13 クーン実験における対流圏放射性降下物成分の ^{137}Cs 沈着密度及び到着時間 (TOA) と第 5 明賀丸の航路

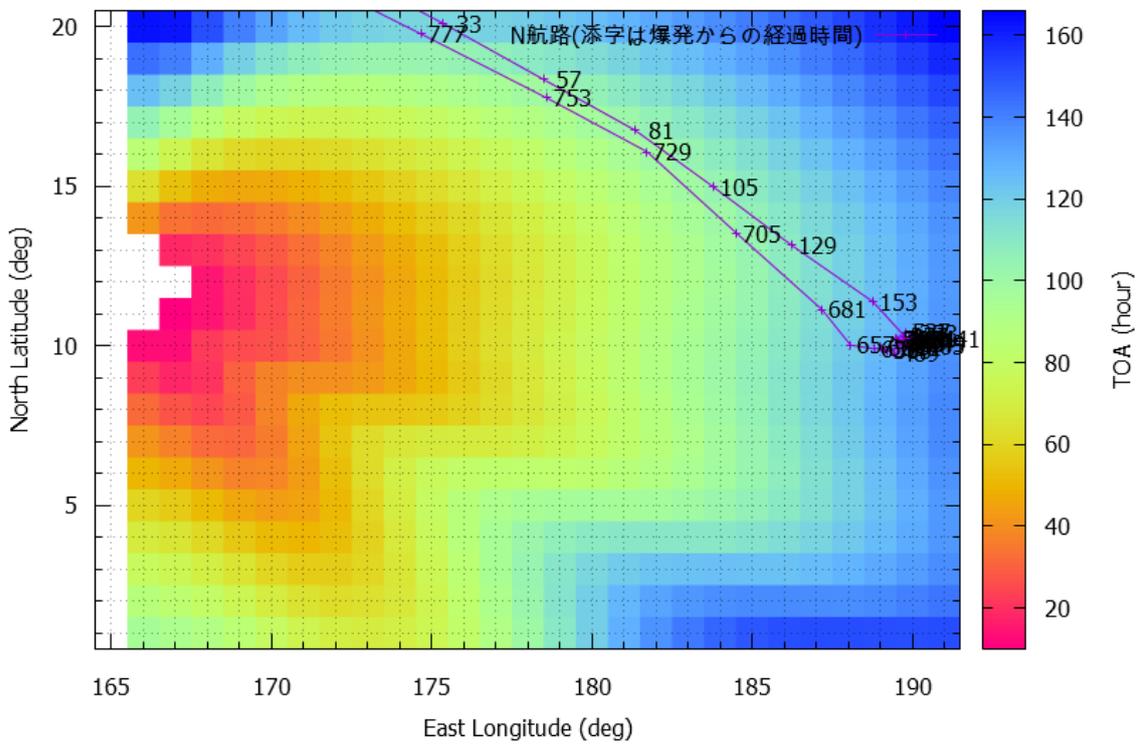
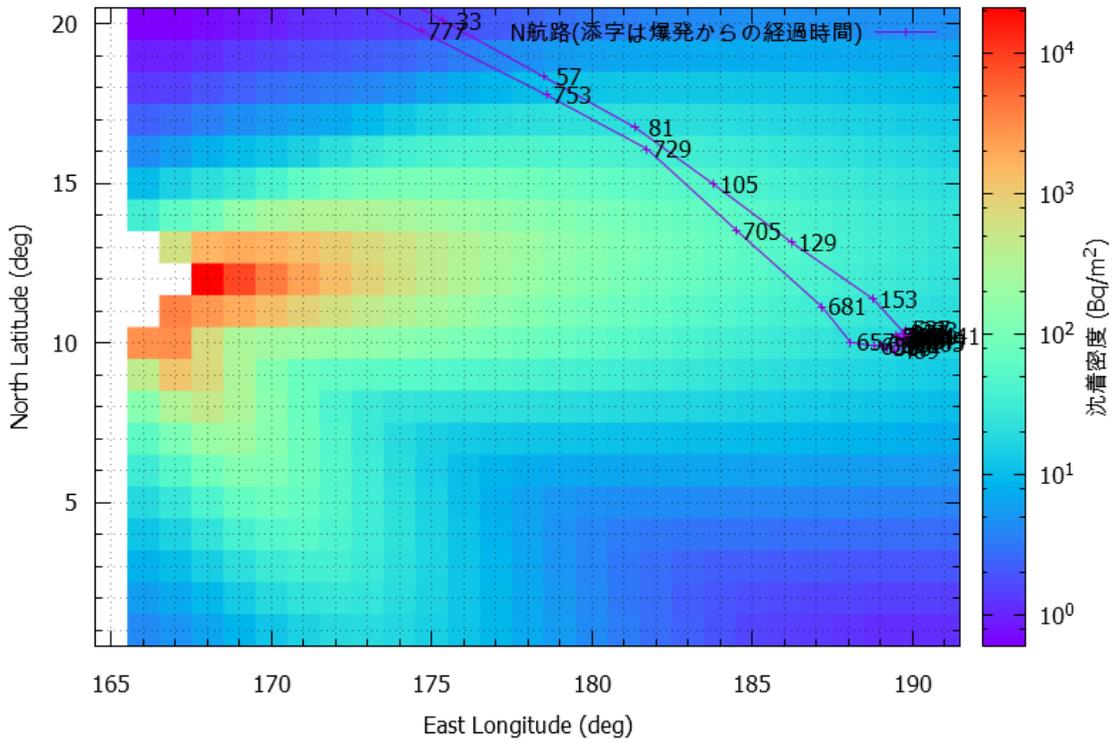


図 14 クーン実験における対流圏放射性降下物成分の ^{137}Cs 沈着密度及び到着時間 (TOA) と第 8 順光丸の航路

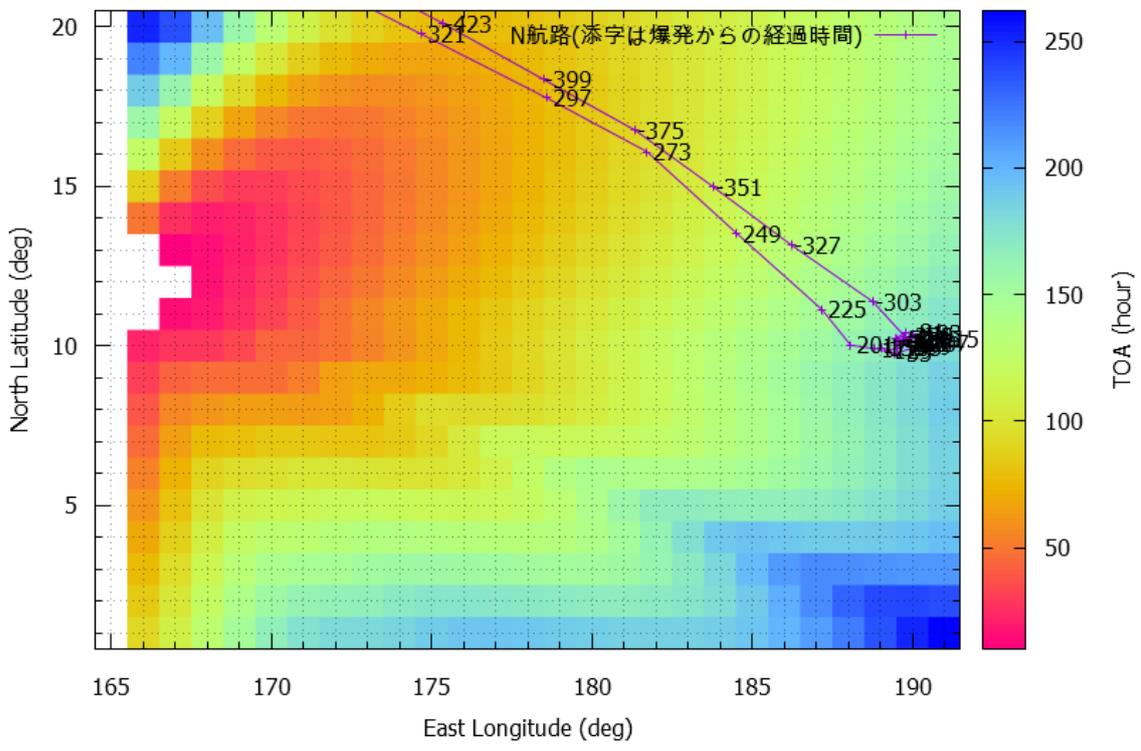
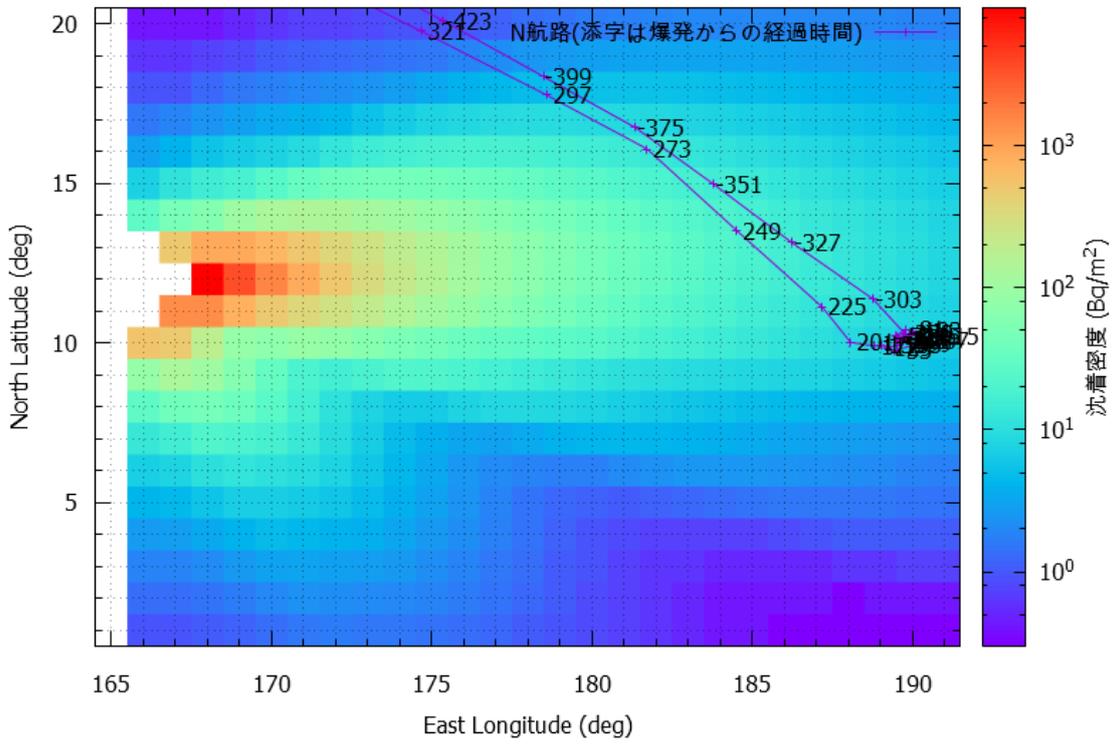


図 15 ユニオン実験における対流圏放射性降下物成分 ^{137}Cs 沈着密度及び到着時間 (TOA) と第 8 順光丸の航路

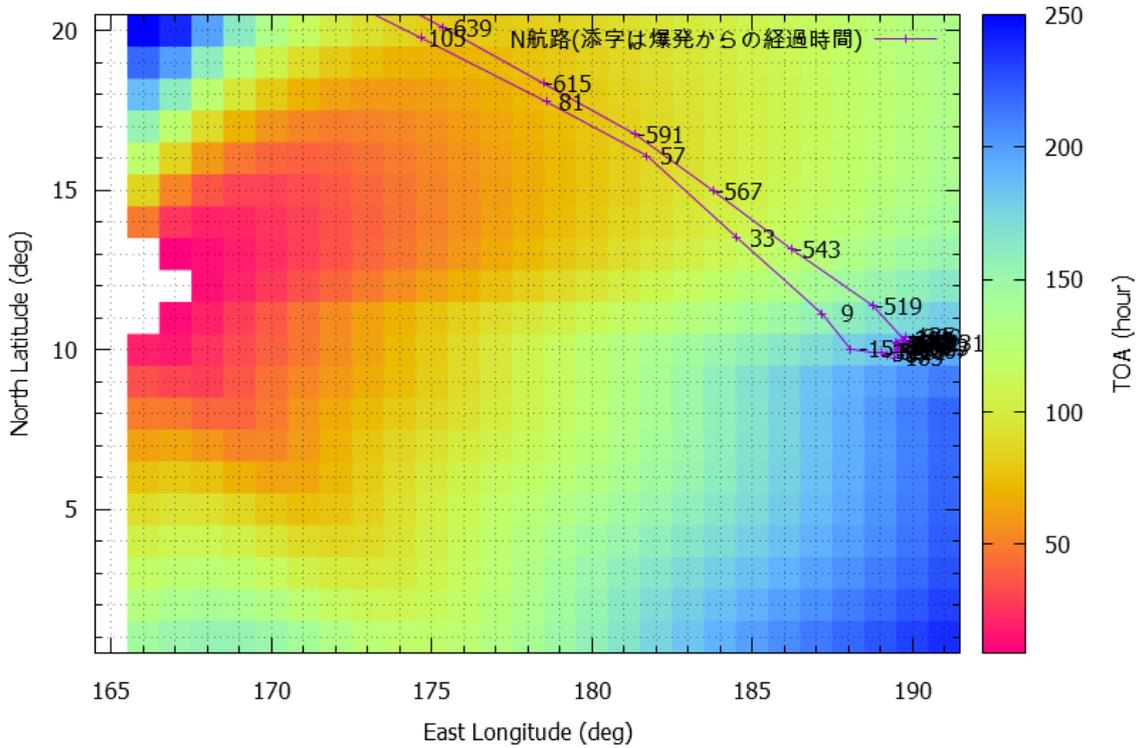
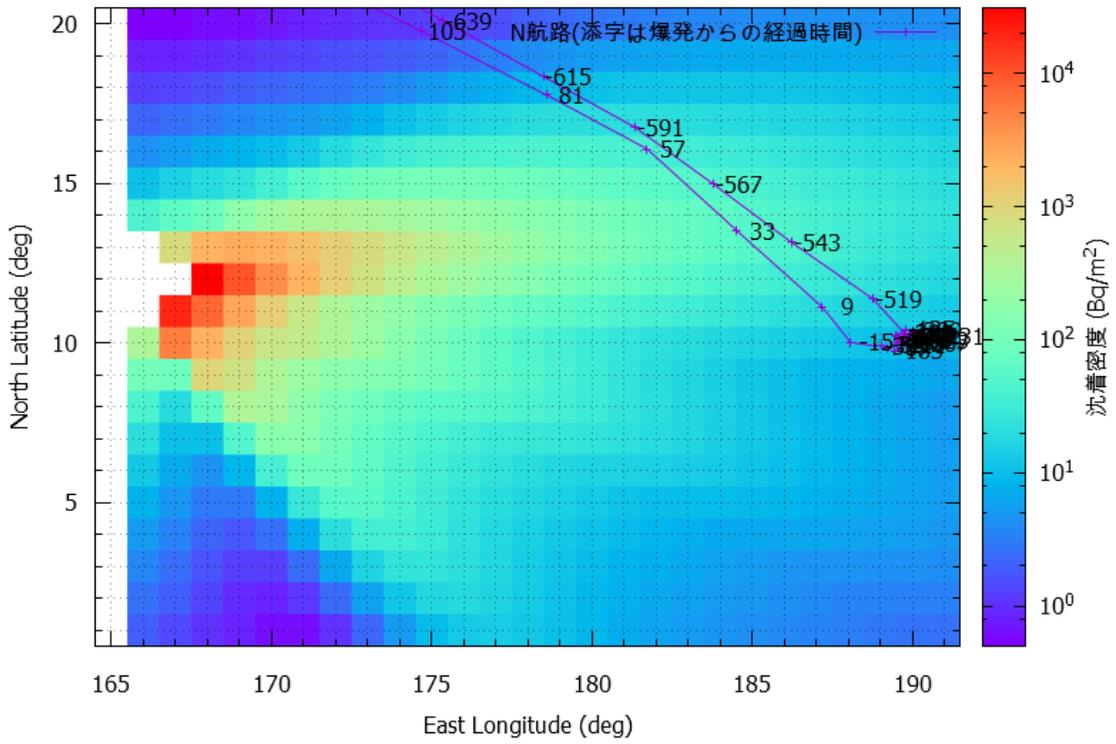


図 16 ヤンキー実験における対流圏放射性降下物成分の ^{137}Cs 沈着密度及び到着時間(TOA)と第 8 順光丸の航路

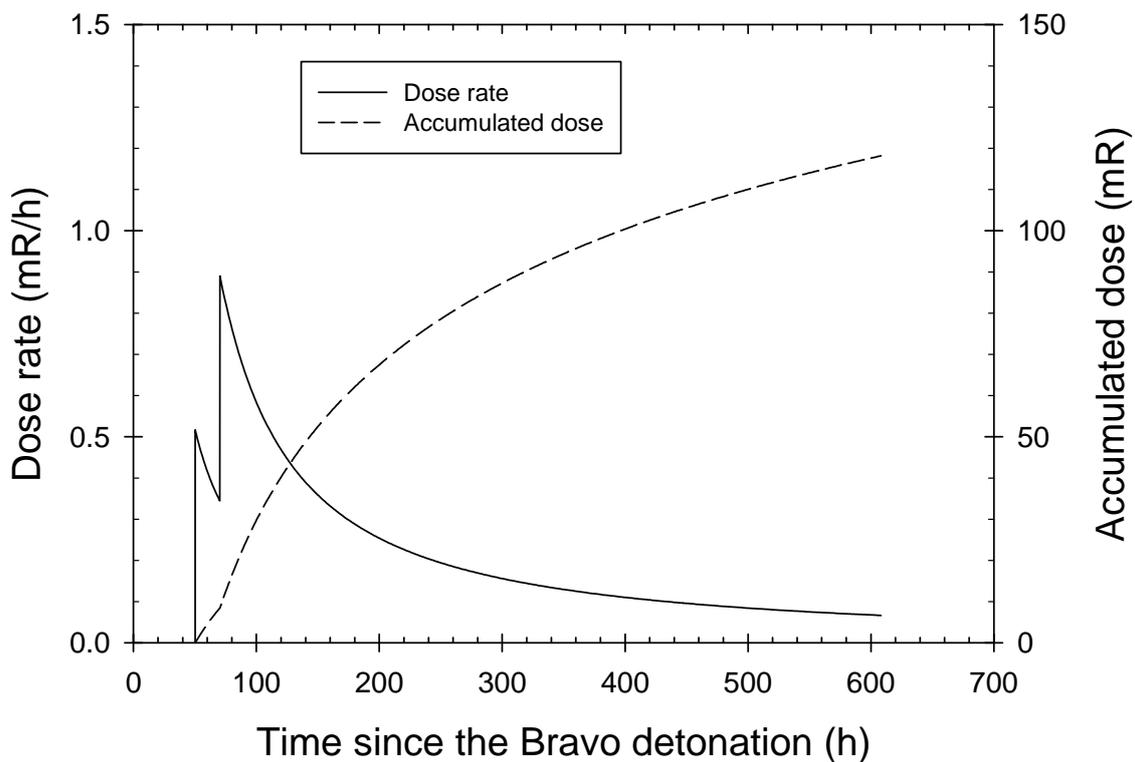


図 17 第 13 光栄丸の船上の線量率と積算線量

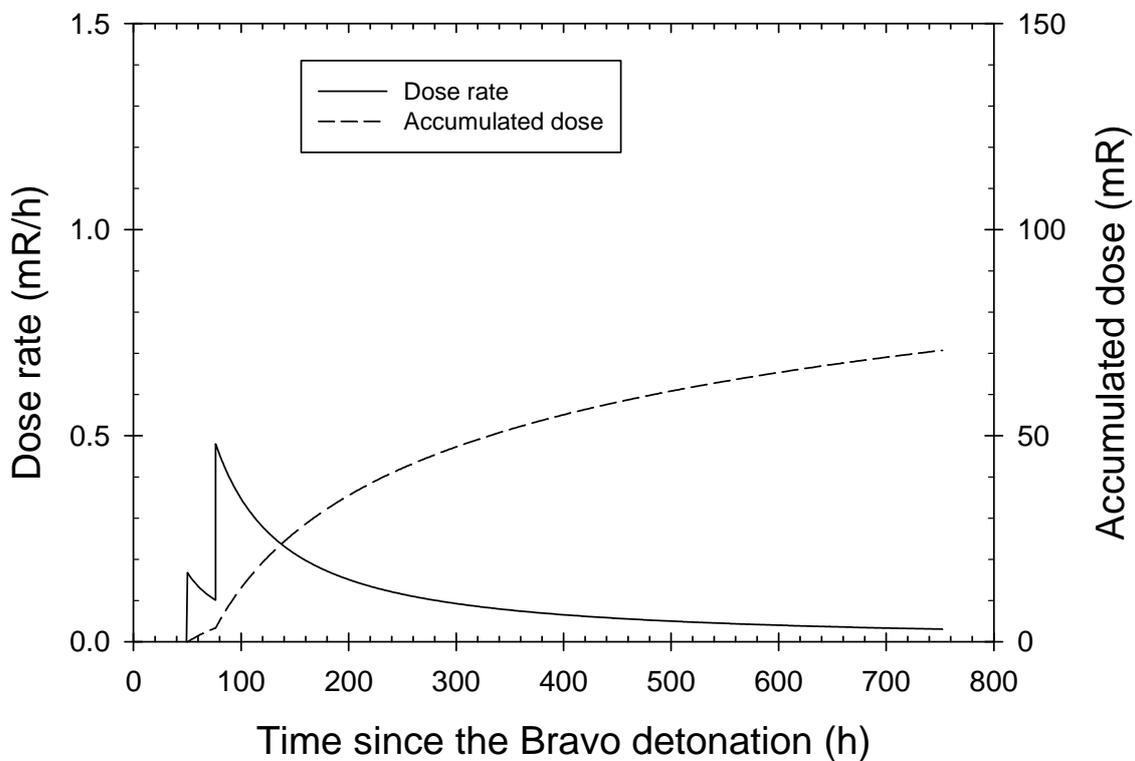


図 18 第 7 大丸の船上の線量率と積算線量

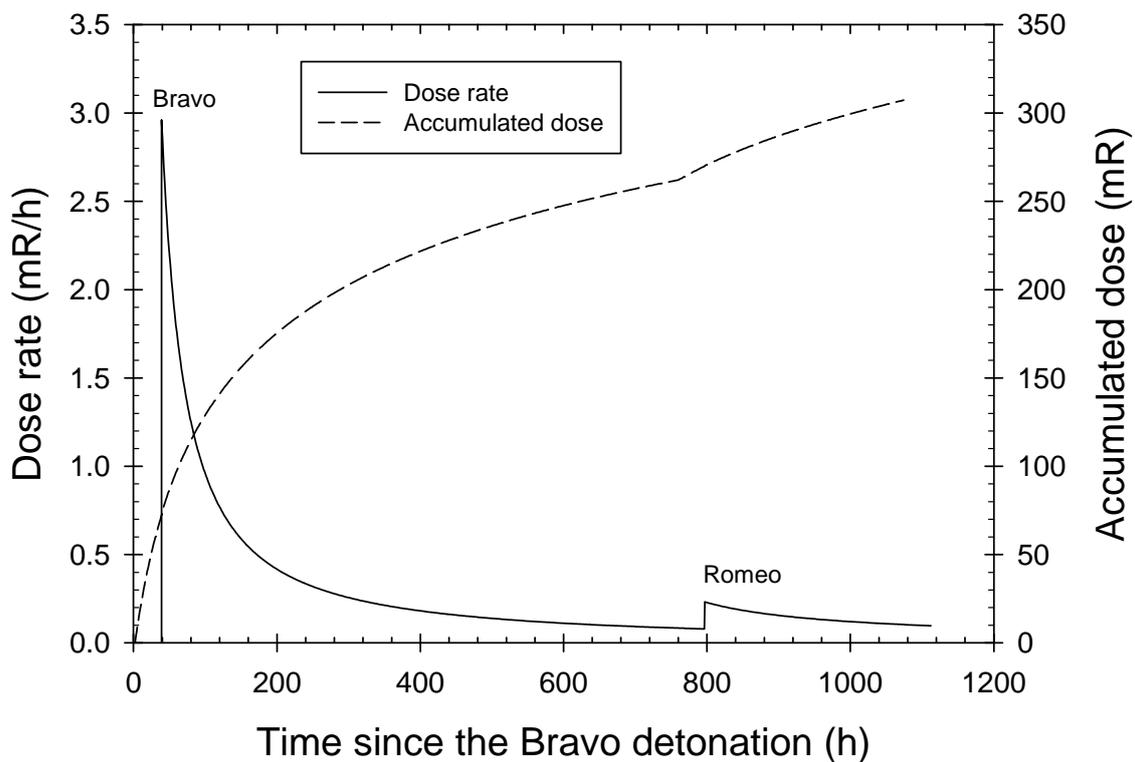


図 19 第 11 高知丸の船上の線量率と積算線量

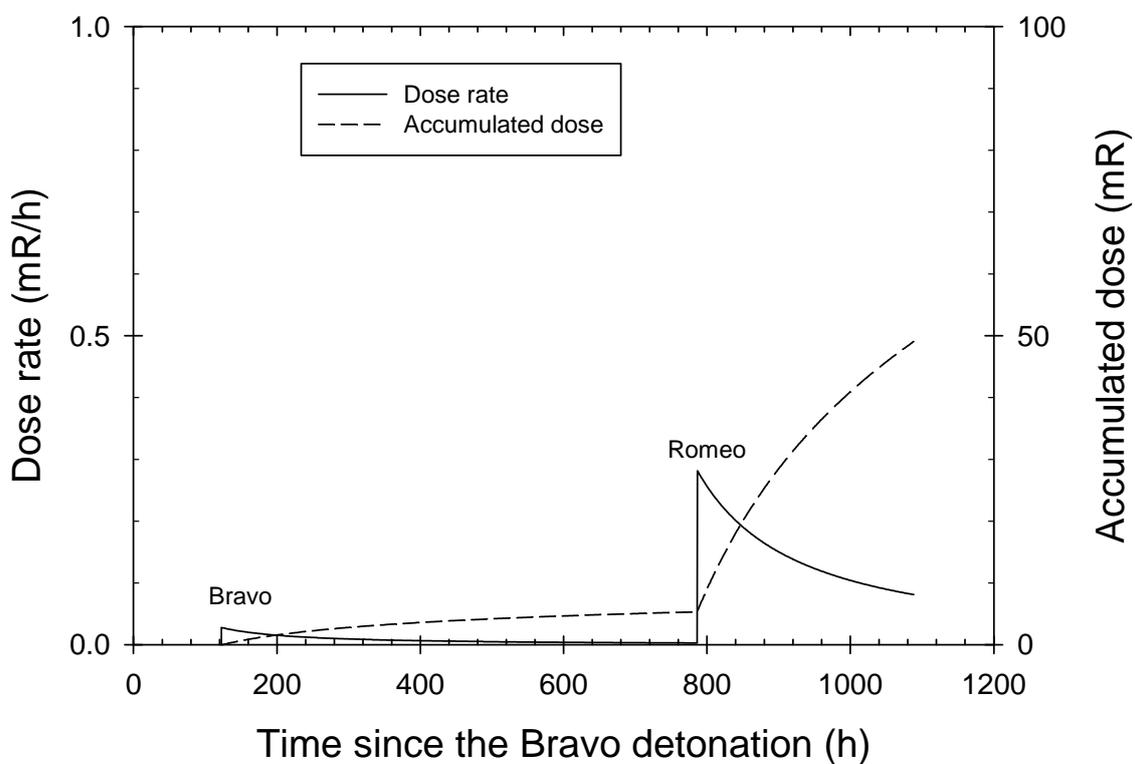


図 20 第 2 幸成丸の船上の線量率と積算線量

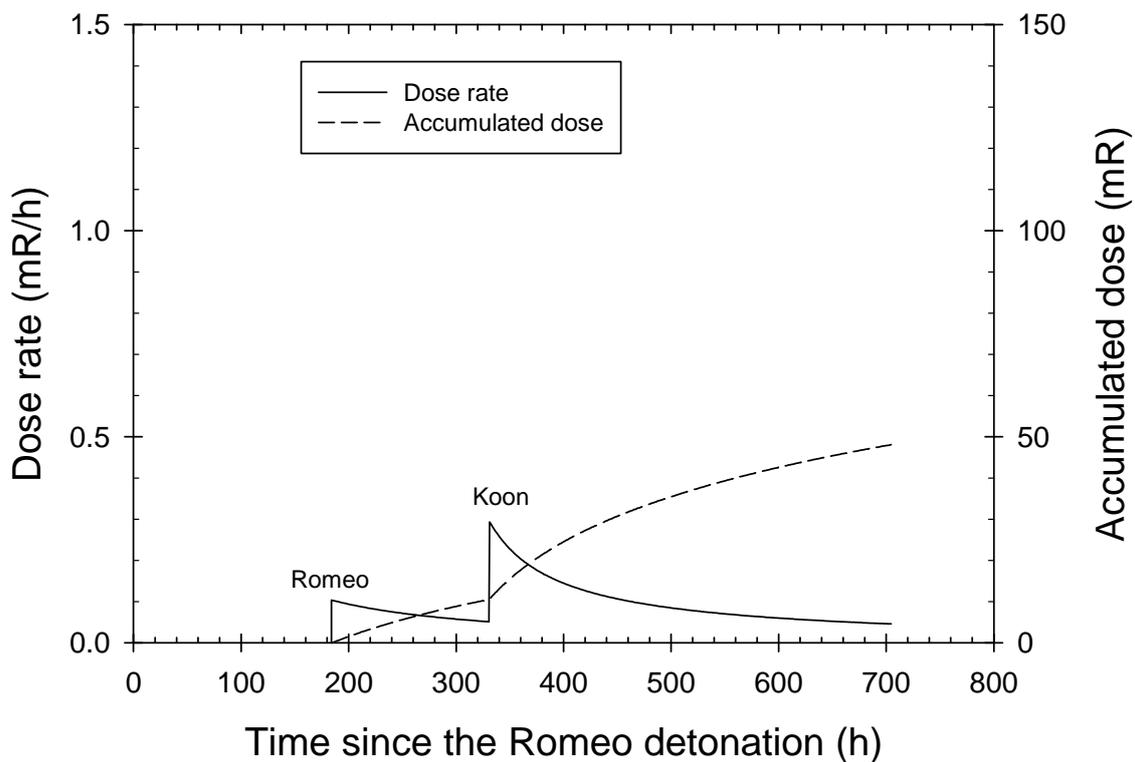


図 21 第 5 明賀丸の船上の線量率と積算線量

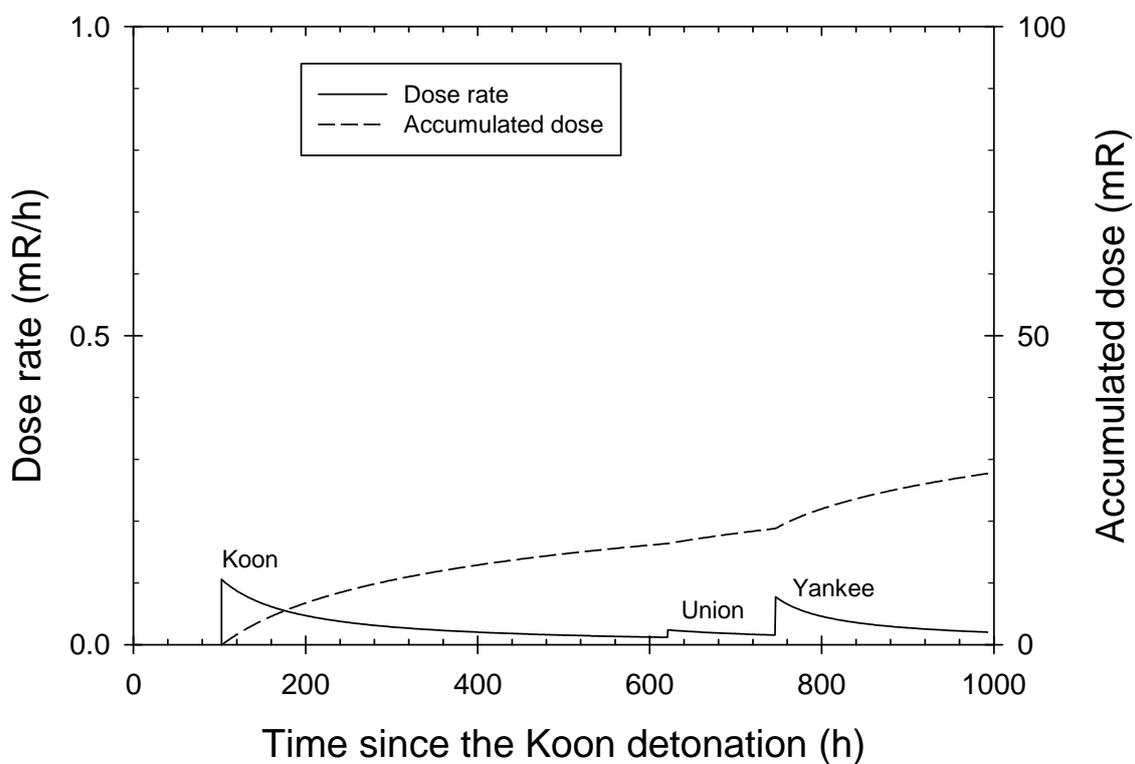


図 22 第 8 順光丸の船上の線量率と積算線量

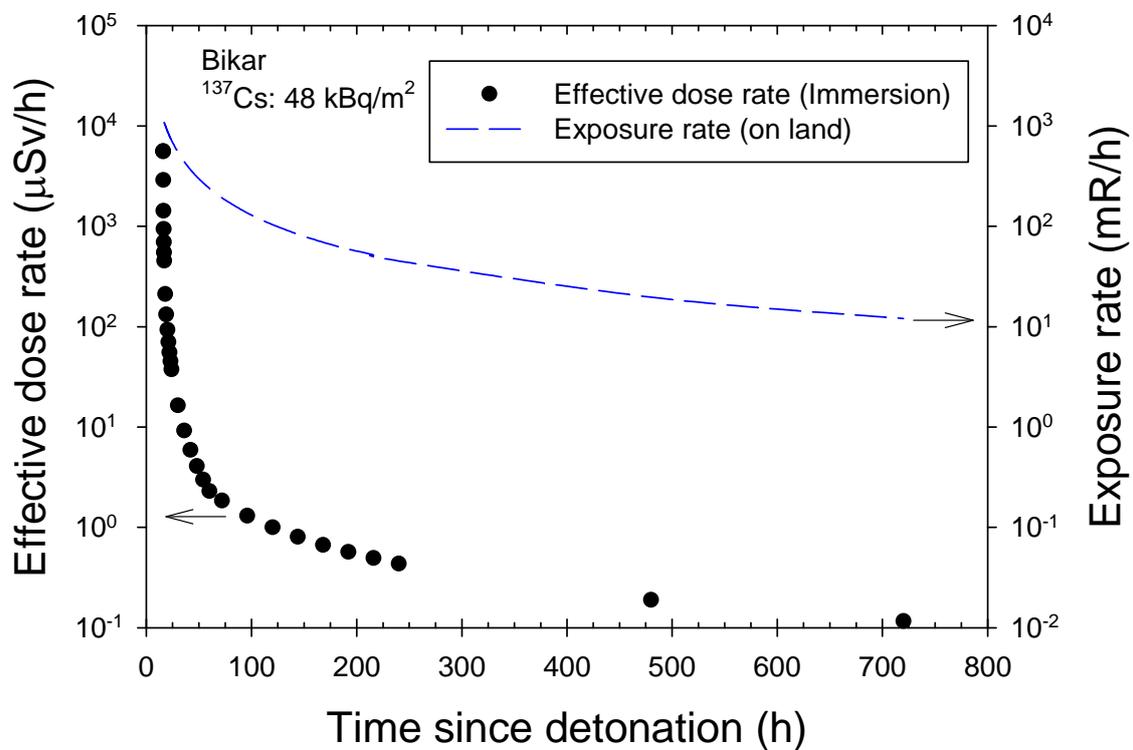


図 23 プラボー実験後、ビカール環礁における陸上での照射線量率と海水中での実効線量率の比較

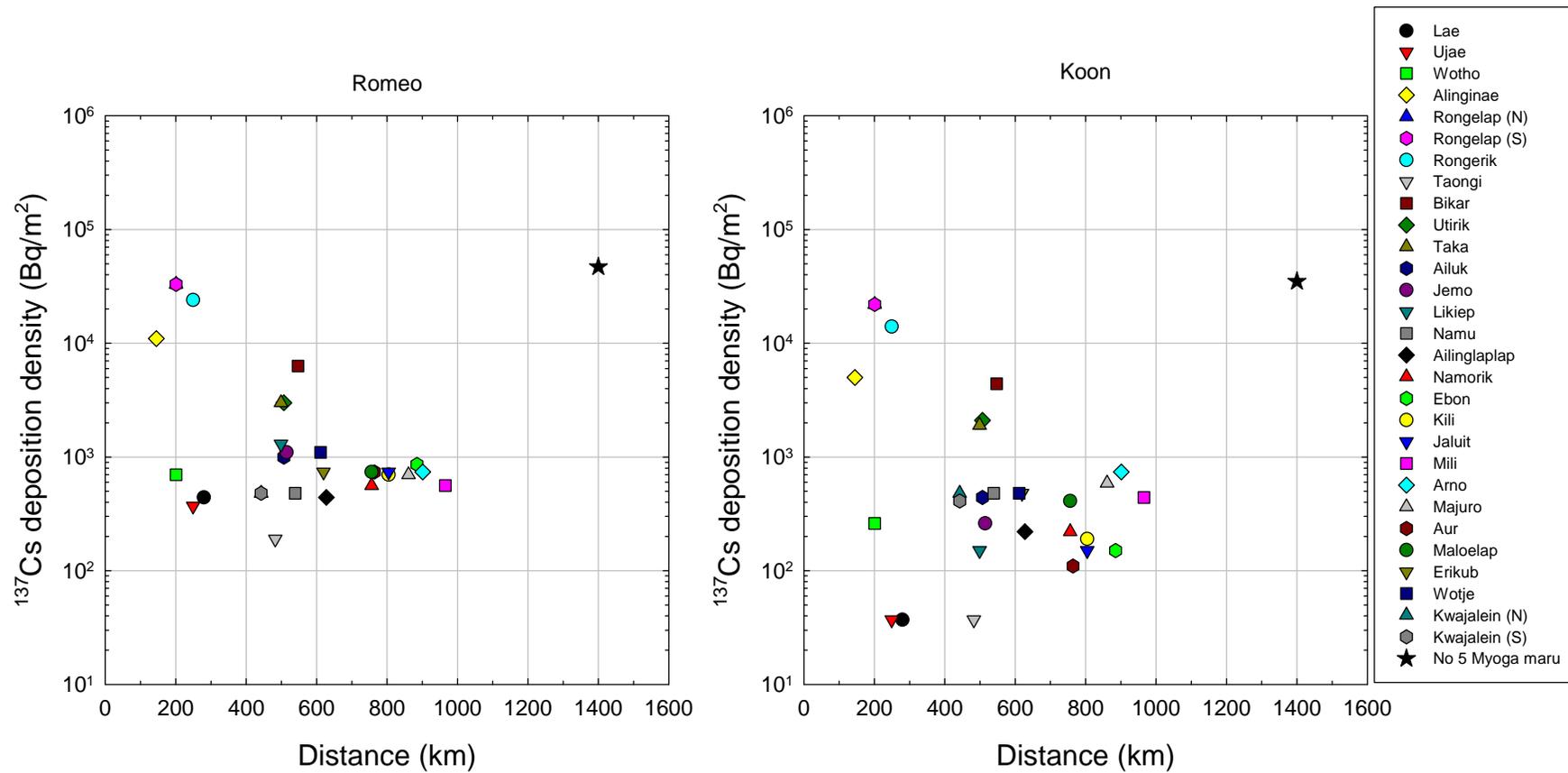


図 24 ロメオ実験（左）及びクーン実験（右）における各環礁の ¹³⁷Cs 沈着密度と爆心からの距離の関係

★印は、第 5 明賀丸に 300 mSv 相当の外部被ばくがあったと仮定して算出した ¹³⁷Cs 沈着密度である。

一方、表 4 に示した同漁船の ¹³⁷Cs 沈着密度の評価値は、77 Bq/m²（ロメオ実験）及び 56 Bq/m²（クーン実験）

であり、距離による ¹³⁷Cs 沈着密度の変化の一般的な傾向に矛盾しない。

別紙 その他の漁船について

1. 各漁船の航路

¹³⁷Cs 沈着密度及び到着時間のヒートマップに、対象とする漁船の航路を重ね合わせたものを図A1～A9に示す。航路とともに図中に示した数字は、爆発からの経過時間（マイナス符号は爆発までの時間）である。

第12 高知丸

図A1：ブラボー実験の爆発時刻にビキニ環礁の東方約1,300 kmで操業中。北緯10度、東経177度付近で、爆発後43 h及び63 hに局地放射性降下物と対流圏放射性降下物にそれぞれ遭遇したと考えられる。

第5 明神丸

図A2：ブラボー実験の爆発時刻にビキニ環礁の東方約1,300 kmで操業中。北緯9.6～9.7度、東経177度付近で、爆発後43 h及び62 hに局地放射性降下物と対流圏放射性降下物にそれぞれ遭遇したと考えられる。

第10 宝成丸¹

図A3：ブラボー実験の爆発時刻にビキニ環礁の東方約2,600 km。マーシャル諸島の東側海域に向けて移動中（北緯11度、西経177～178度付近）、爆発後64 h及び73 hに局地放射性降下物と対流圏放射性降下物にそれぞれ遭遇したと考えられる。

¹ 本船の位置は、3月1日：北緯10度45分、西経177度17分、3月26日：北緯22度45分、東経169度5分（文献「ビキニ水爆被災資料集（新装版）」の214頁）及び3月6～23日：北緯9度～11度43分、東経176～177度の海域で操業（平成26年9月19日付厚労省開示資料No.60）による。操業中は上記矩形海域の北西端に滞在し続けたと仮定した。また、詳細時刻は日本時間12:00とした。また、本報告では、計算の対象範囲を西経海域まで拡大した。

瑞洋丸

図A4：ブラボー実験の爆発時刻にビキニ環礁の北西約1,800 kmを南下。その移動中（北緯16度、東経166度付近）、爆発の86 h後に対流圏放射性降下物に遭遇した可能性がある。

図A5：ロメオ実験の爆発時刻にビキニ環礁の東方約1,200 kmに滞在。漁労作業終了後、北上中に北緯12度、東経175度付近で、爆発の120 h後に対流圏放射性降下物に遭遇したと考えられる。

第12 宝幸丸

図A6：ブラボー実験の爆発時刻にビキニ環礁の北西約2,400 kmを南下。放射性降下物との遭遇はなかったと思われる。

図A7：ロメオ実験の爆発時刻にビキニ環礁の東方約1,400 kmに滞在。北緯16度、東経177度付近で、爆発の150 h後に対流圏放射性降下物に遭遇したと考えられる。

尾形海幸丸

図A8：ブラボー実験の爆発時刻にビキニ環礁の北西約2,400 kmを南下。放射性降下物との遭遇はなかったと思われる。

図A9：ロメオ実験の爆発時刻にビキニ環礁の東方約900 kmに滞在。北緯9.8度、東経173度付近で、爆発の130 h後に対流圏放射性降下物に遭遇したと考えられる。

2. 外部被ばくによる線量

それぞれの漁船について外部被ばくによる線量を評価した結果を表A1に示す。

第12 高知丸と第5 明神丸については、局地放射性降下物と対流圏放射性降下物による線量寄与の内訳がやや変化したものの、合計の線量では、厚労科研報告書の評価値と大きく変わらない。一方、第10 宝成丸については、厚労科

研報告書の評価値を超える値となった。これは、計算対象範囲を西経海域側まで拡張したことによるものである。また、尾形海幸丸については、厚労科研報告書では 86 mR に相当する対流圏放射性降下物を受けたと評価していたが、これは、ビキニ環礁の北側にも一様な強度で対流圏放射性降下物が広がると仮定した旧計算モデルに起因した過大な値であり、むしろほとんど被ばくを受けなかったと考えられる。

また、各漁船上の線量率の変化及び放射性降下物との遭遇後の積算線量を、爆発後の経過時間の関数として表したものを図A10～A15に示す。

3. ^{137}Cs 沈着密度と距離の関係

各漁船について算出された ^{137}Cs 沈着密度をビキニ環礁からの距離の関数として表したものを図A16～A20に示す。×印は、文献[14]から引用した各環礁における ^{137}Cs 沈着密度である。漁船の沈着密度で、凡例中の記号 L, T は、それぞれ局地放射性降下物、対流圏放射性降下物による成分を表す。

図 A16 (ブラボー実験) : ^{137}Cs 沈着密度 10^4 Bq/m^2 を超えるプロットは、いずれも局地放射性降下物を受けた環礁 (アイリングナ, ロングラップ (北部²と南部), ロングリック, ビカール, ウチリック及びタカ環礁) のものである。図中の実線は、計算によって求めた局所放射性降下物分布の中心線上の沈着密度であり、ビキニ環礁から近いその線上付近に第5福竜丸がいた。局地放射性降下物のうち3日目以降に落ちる成分に第12高知丸等も遭遇したと考えられるが、それらの位置が放

射性降下物分布の中心線から南側に外れるため、船上の沈着密度は実線の値よりも小さくなる。また、 10^4 Bq/m^2 未満のプロットは、いずれも対流圏放射性降下物による。破線は、方位 90 度、56 度及び 12 度の距離 500 km における沈着密度を始点とした距離の -3 乗カーブであり、同様の方位にいた漁船の沈着密度もそのカーブ上で見つけることができる。

図 A17 (ロメオ実験) : 各環礁の ^{137}Cs 沈着密度 (×プロット) は、すべて対流圏放射性降下物による。図には、方位 58 度及び 85 度における距離の -3 乗カーブを示す。

図 A18 (クーン実験) : 各環礁の ^{137}Cs 沈着密度 (×プロット) は、すべて対流圏放射性降下物による。実線は、計算によって求めた局地放射性降下物の分布の中心軸上の沈着密度であるが、この核実験実施時刻における風は北向きであり、局地放射性降下物の分布範囲内に漁船はいない。破線は、方位 79 度及び 99 度における距離の -3 乗カーブである。

図 A19 (ユニオン実験) : 沈着密度 10^3 Bq/m^2 を超えるデータには局地放射性降下物による寄与が一部含まれる。方位 92 度における距離の -3 乗カーブを破線で示す。

図 A20 (ヤンキー実験) : 沈着密度 10^4 Bq/m^2 に近い幾つかの島のデータには局地放射性降下物による寄与が一部含まれる。破線は、方位 66 度、距離 500 km で 680 Bq/m^2 を始点とした距離の -3 乗カーブであり、方位 83 度のビカール (7.4 kBq/m^2) と方位 50 度のタオンギ (37 Bq/m^2) の間の内挿に基づいた。

² ロングラップ環礁での放射性降下物沈着密度は、北部 > 南部である。第五福竜丸はロングラップ環礁の北側海域にいた。

表 A1 各漁船の放射性降下物遭遇時の座標，距離，経過時間，¹³⁷Cs 沈着密度及び外部被ばくによる線量

船名	核実験	局地放射性降下物						対流圏放射性降下物						照射線量 (合計) (mR)	実効線量 (合計) (mSv)	積分 期間 (迄)
		北緯	東経	距離	経過 時間	¹³⁷ Cs (船上)	照射線量	北緯	東経	距離	経過 時間	¹³⁷ Cs (船上)	照射線量			
		(度)	(度)	(km)	(h)	(Bq/m ²)	(mR)	(度)	(度)	(km)	(h)	(Bq/m ²)	(mR)			
第12高知丸	ブラボー	10.0	177	1,300	43	120	71	10.0	177	1,300	63	180	84	155	1.11	3/17
第5明神丸	ブラボー	9.6	177	1,300	43	33	22	9.7	177	1,300	62	190	103	125	0.89	3/27
第10宝成丸	ブラボー	11.3	-177	1,900	64	64	37	11.3	-178	1,800	73	72	39	76	0.54	4/2
瑞洋丸	ブラボー							16.3	166	520	86	39	21	21	0.15	4/13
	ロメオ							12.3	175	1,000	120	660	198	198	1.42	
第12宝幸丸	ブラボー															4/13
	ロメオ							16.0	177	1,300	150	87	21	21	0.15	
尾形海幸丸	ブラボー															4/14
	ロメオ							9.8	173	870	130	240	71	71	0.51	

注：距離，経過時間及び¹³⁷Cs 沈着密度の有効数字は2桁とした。ただし，照射線量については，局地放射性降下物と対流圏放射性降下物による寄与の合計の計算を分かりやすくするため最小単位 1 mR で表記した。また，実効線量への換算は，本文中に記述した手順による。

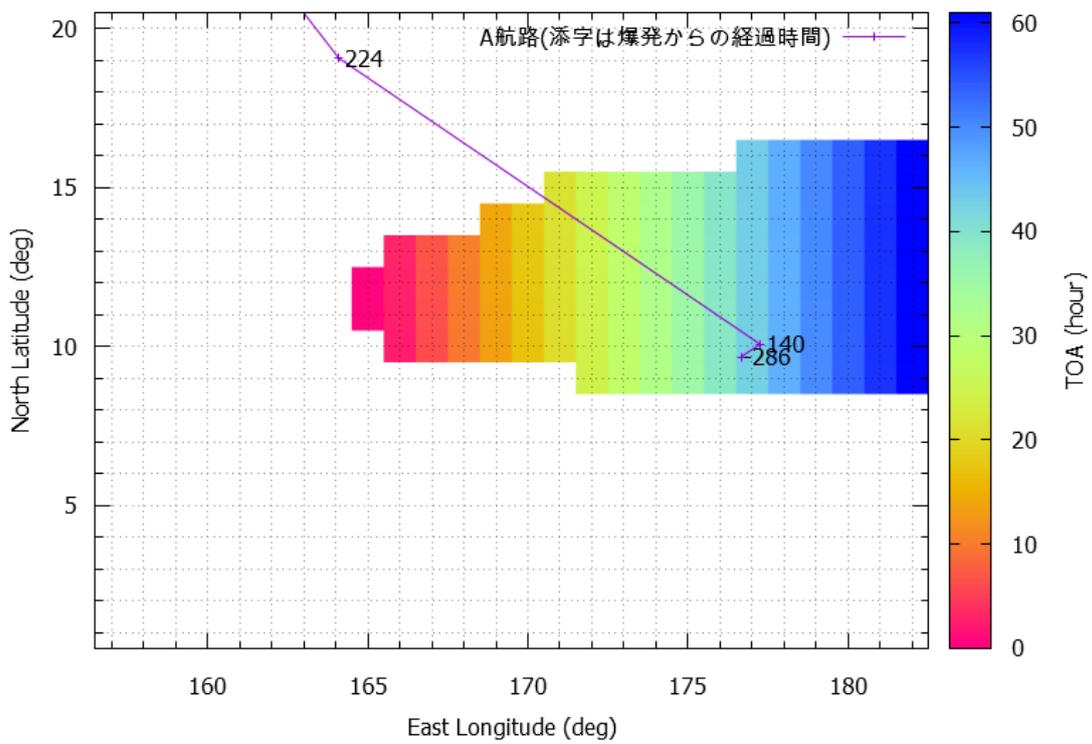
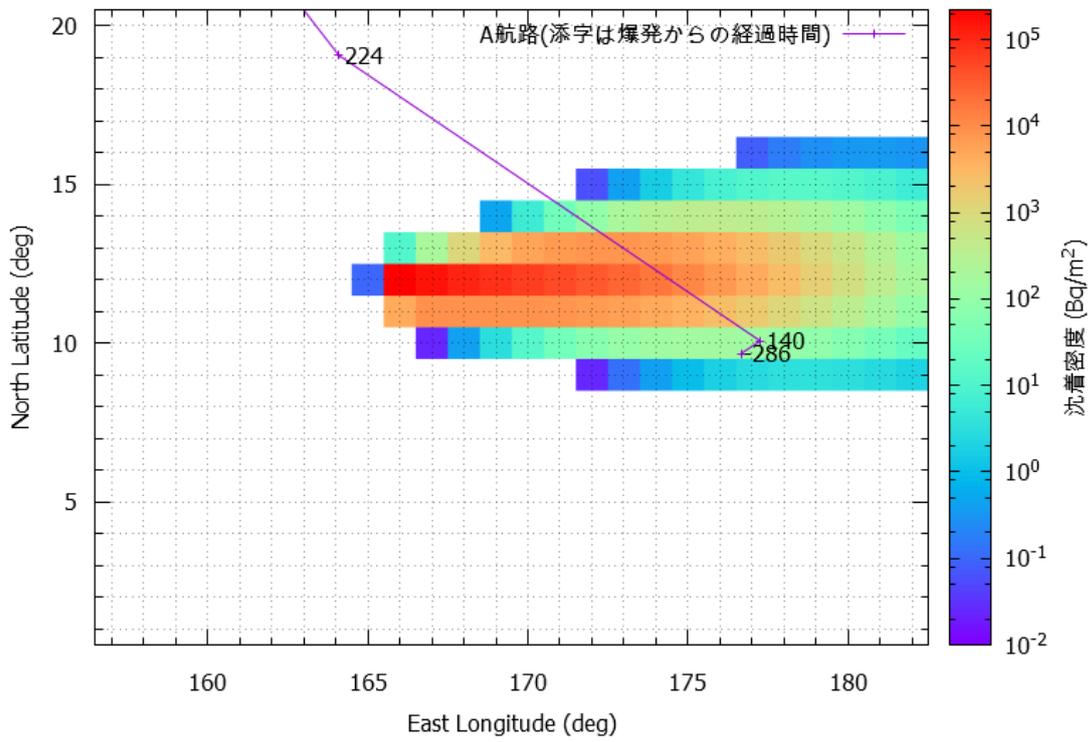


図 A1(a) ブラボー実験における局地放射性降下物成分の ^{137}Cs 沈着密度及び到着時間 (TOA) と第 12 高知丸の航路

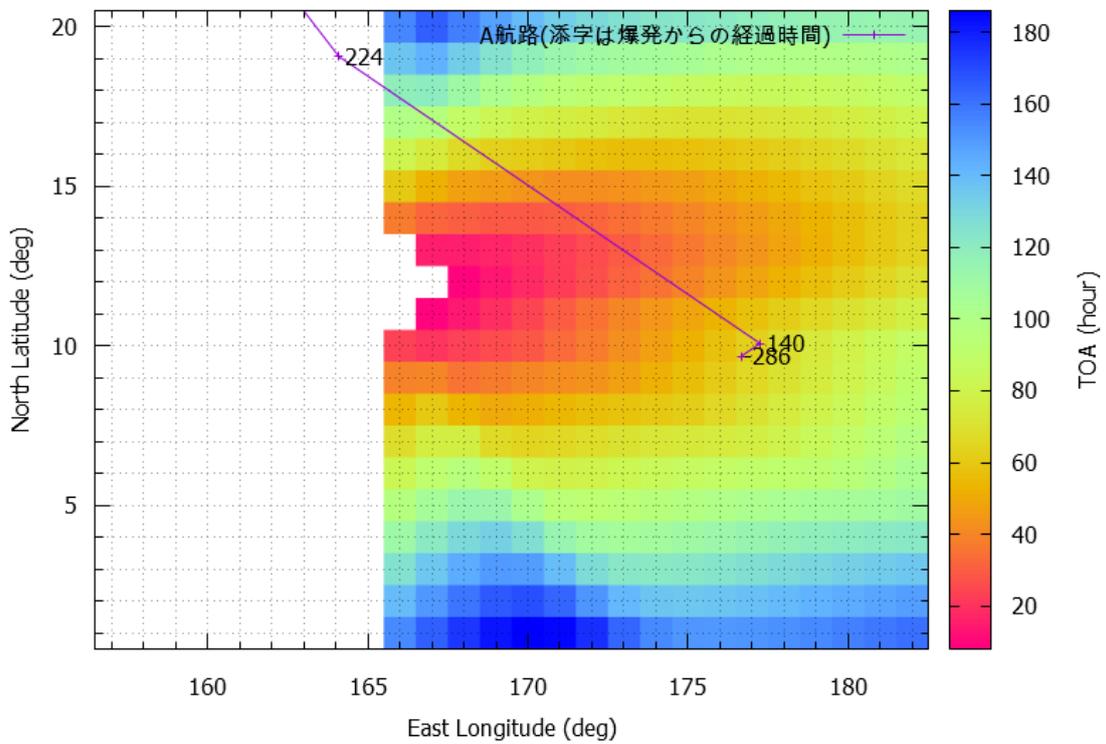
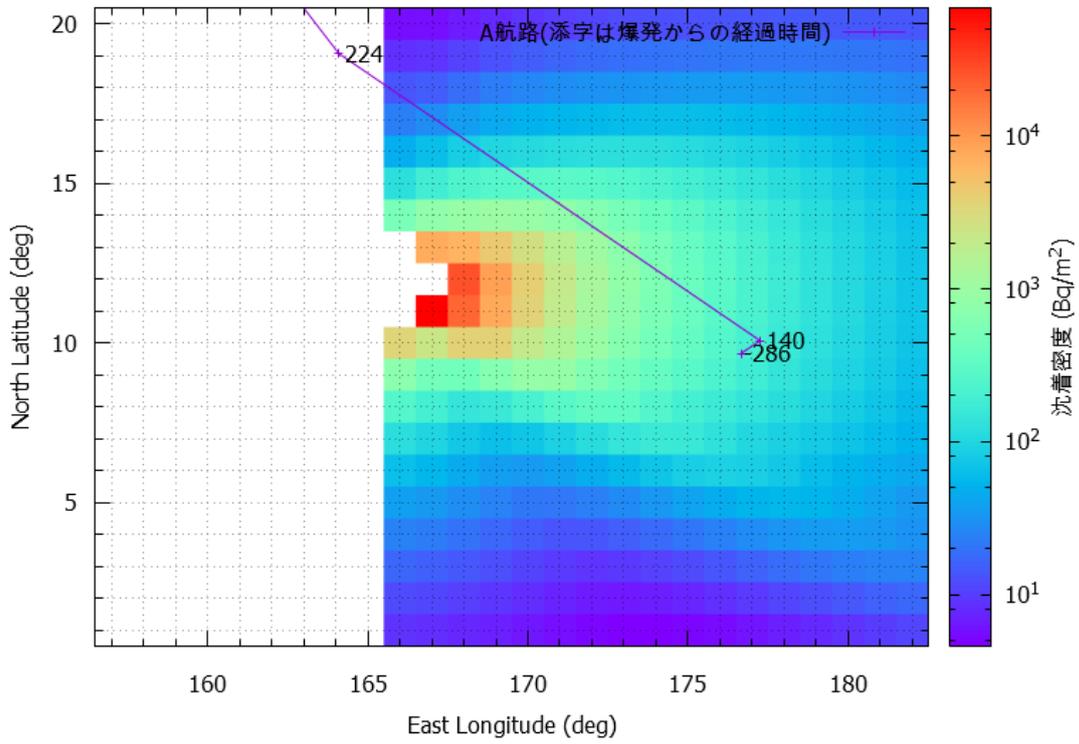


図 A1(b) ブラボー実験における対流圏放射性降下物成分の ^{137}Cs 沈着密度及び到着時間 (TOA) と第 12 高知丸の航路

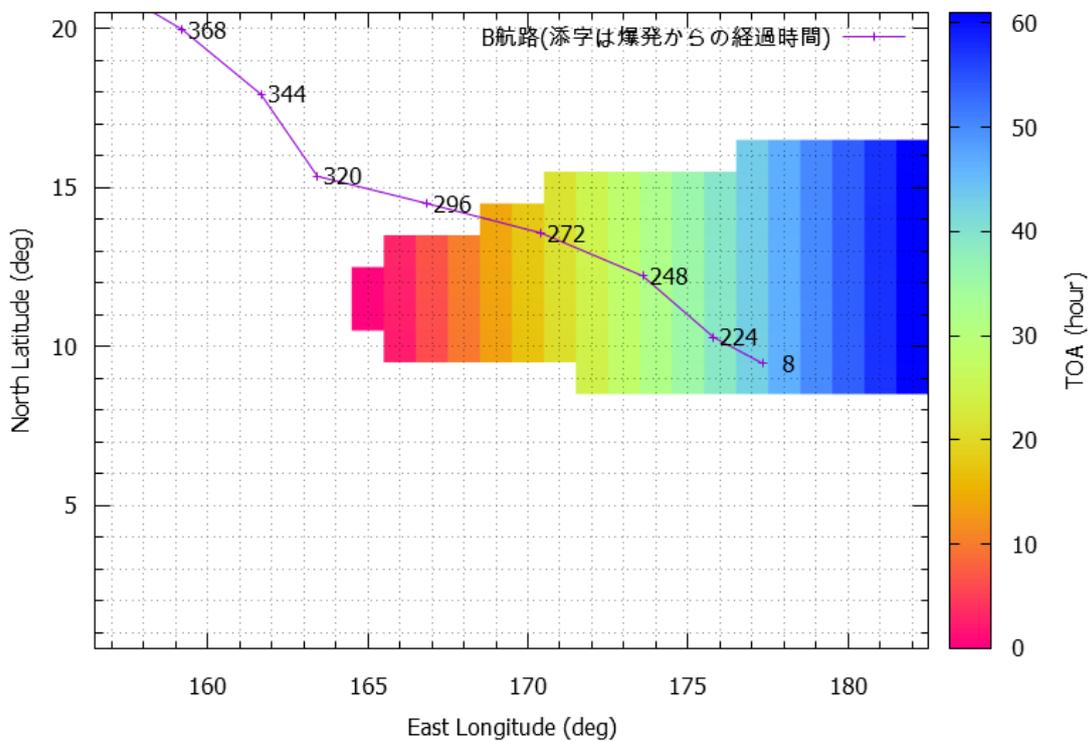
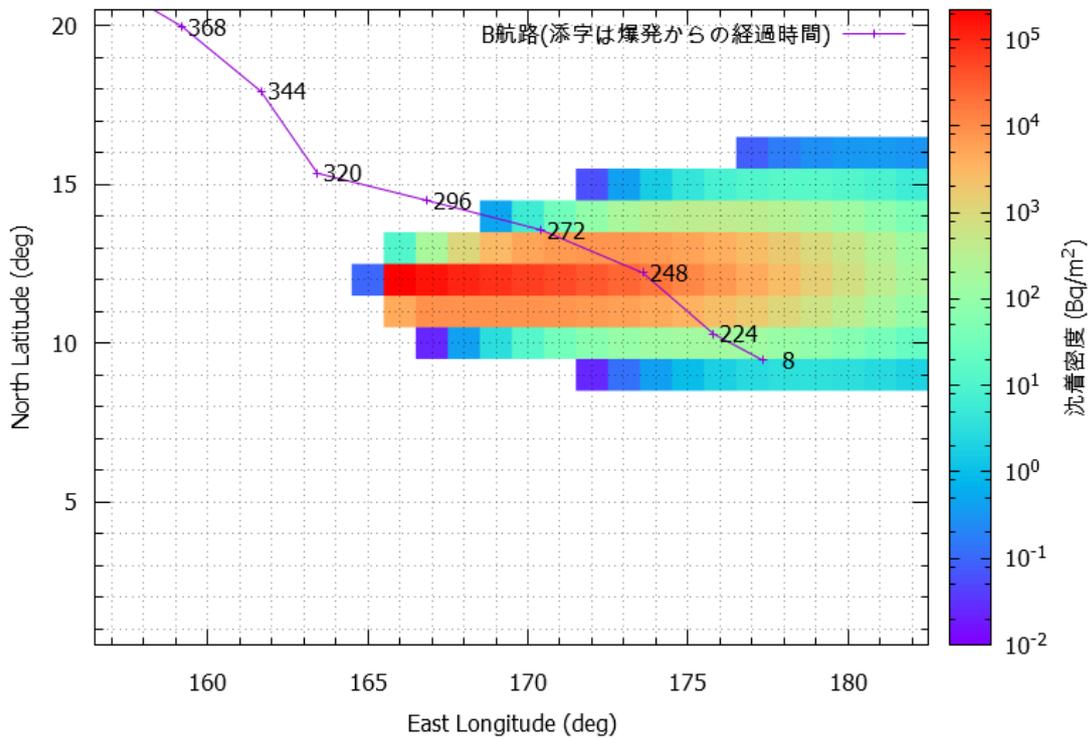


図 A2(a) ブラボー実験における局地放射性降下物成分の ^{137}Cs 沈着密度及び到着時間 (TOA) と第 5 明神丸の航路

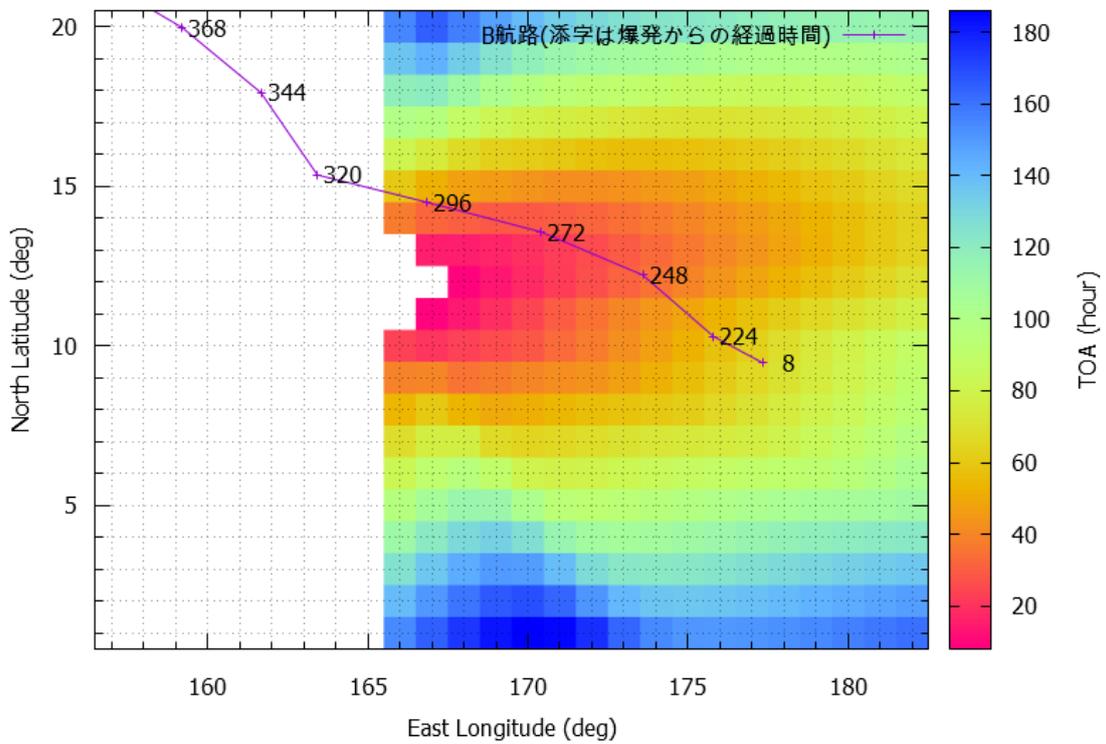
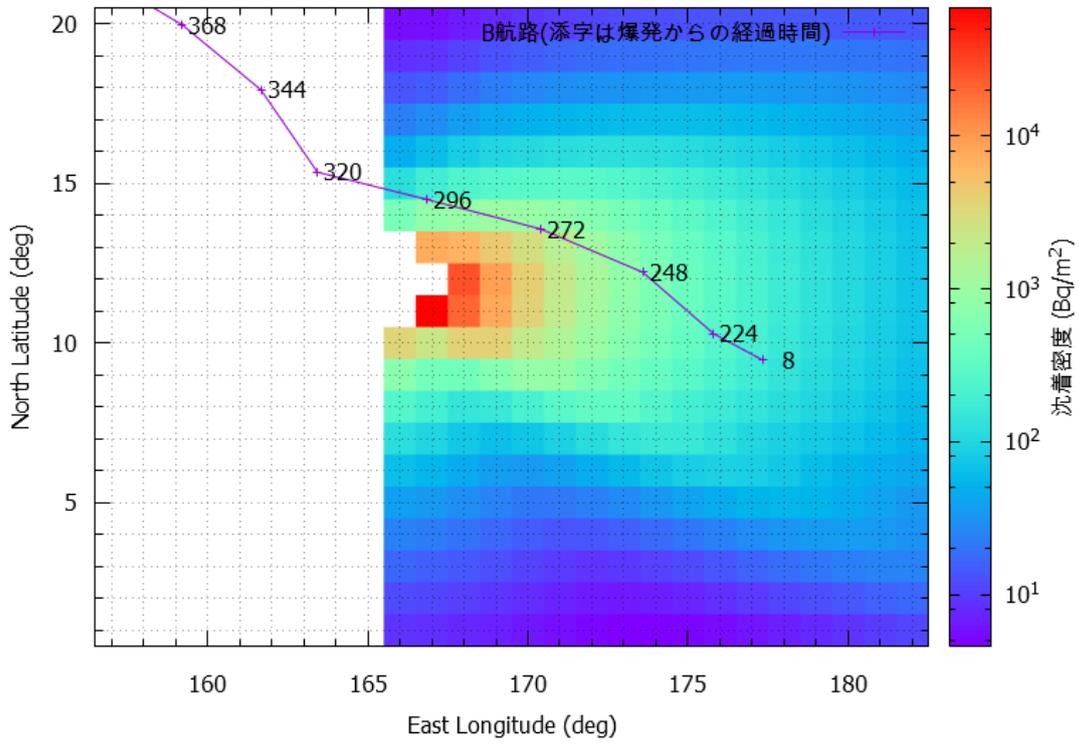


図 A2(b) ブラボー実験における対流圏放射性降下物成分の ^{137}Cs 沈着密度及び到着時間 (TOA) と第 5 明神丸の航路

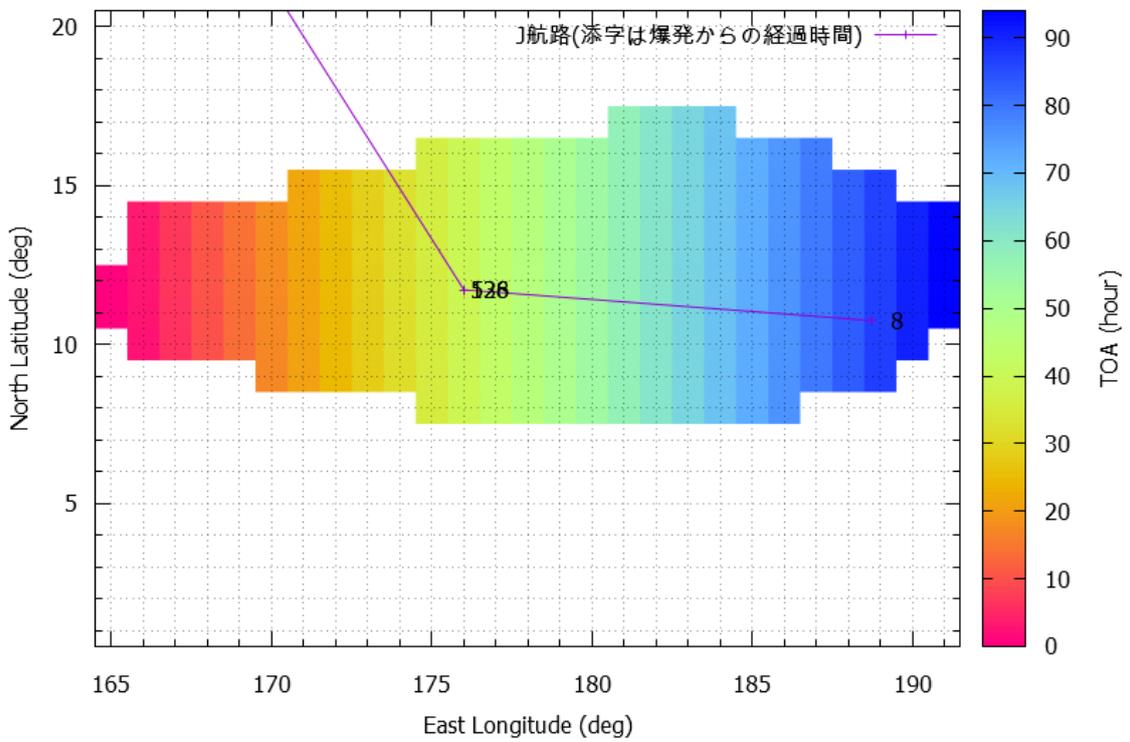
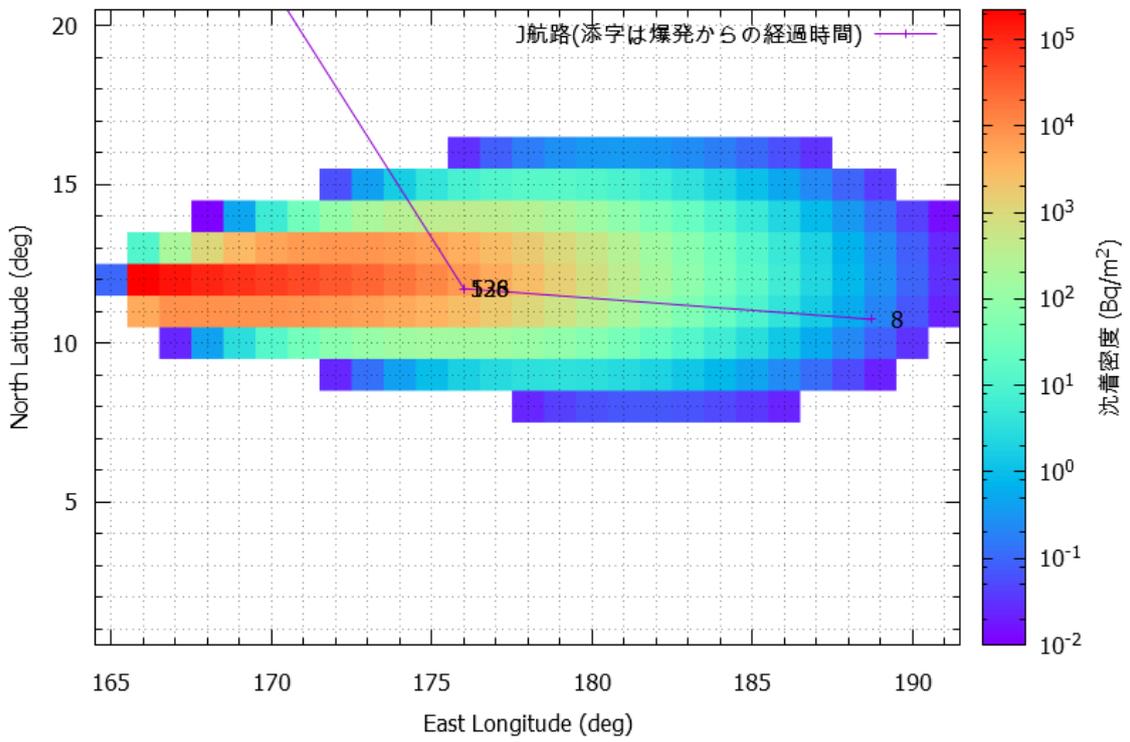


図 A3(a) ブラボー実験における局地放射性降下物成分の ^{137}Cs 沈着密度及び到着時間 (TOA) と第 10 宝成丸の航路

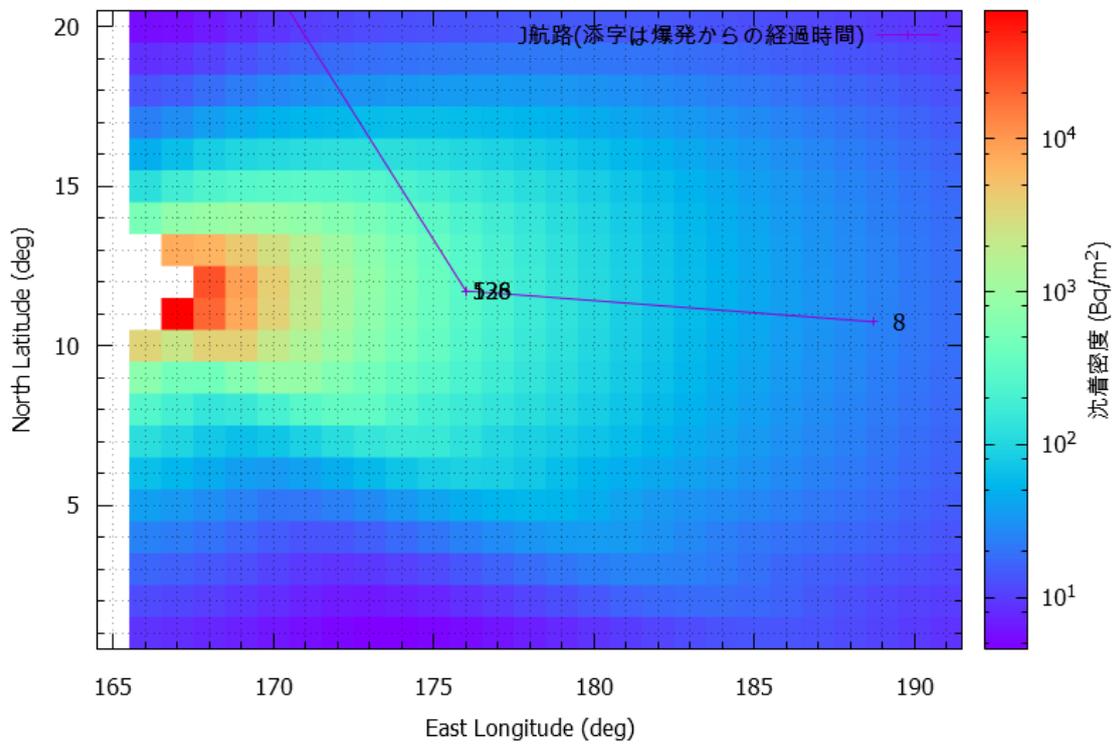
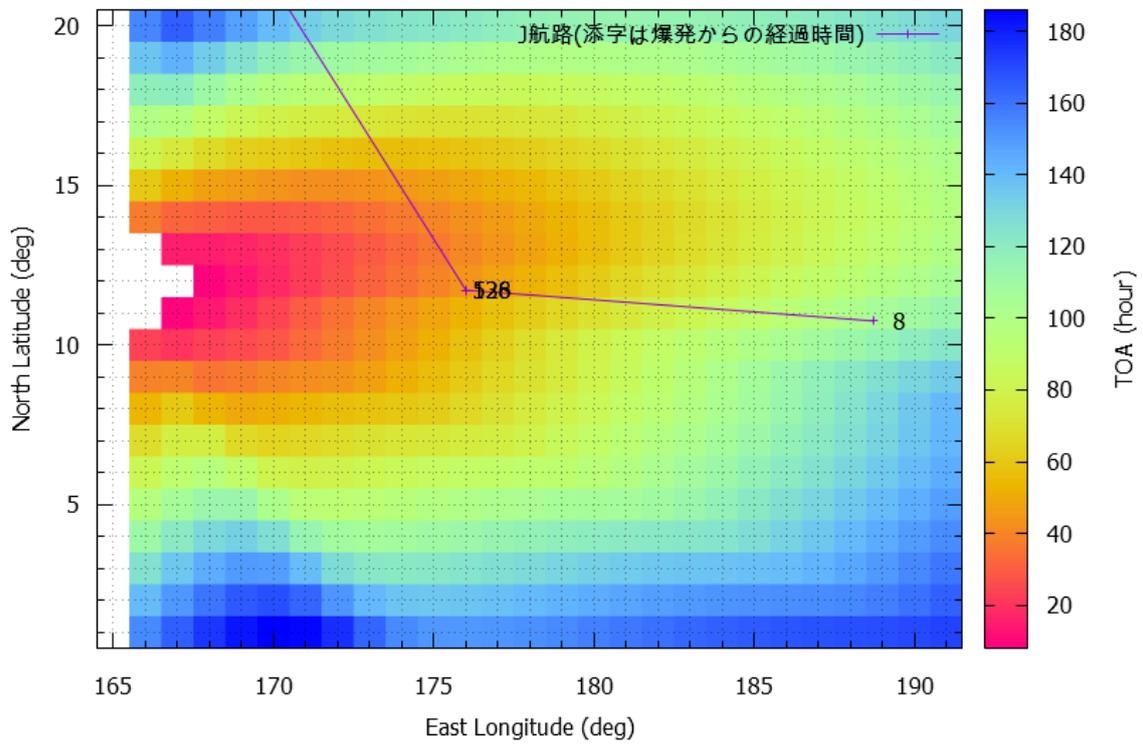


図 A3(b) ブラボー実験における対流圏放射性降下物成分の ^{137}Cs 沈着密度及び到着時間 (TOA) と第 10 宝成丸の航路

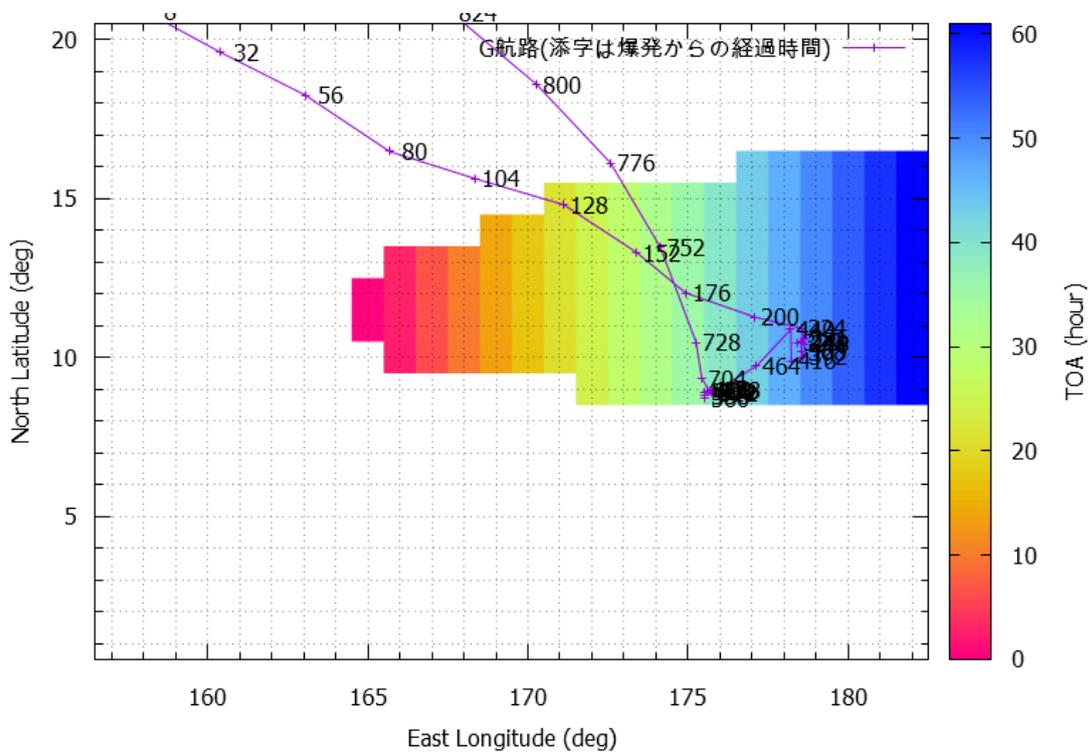
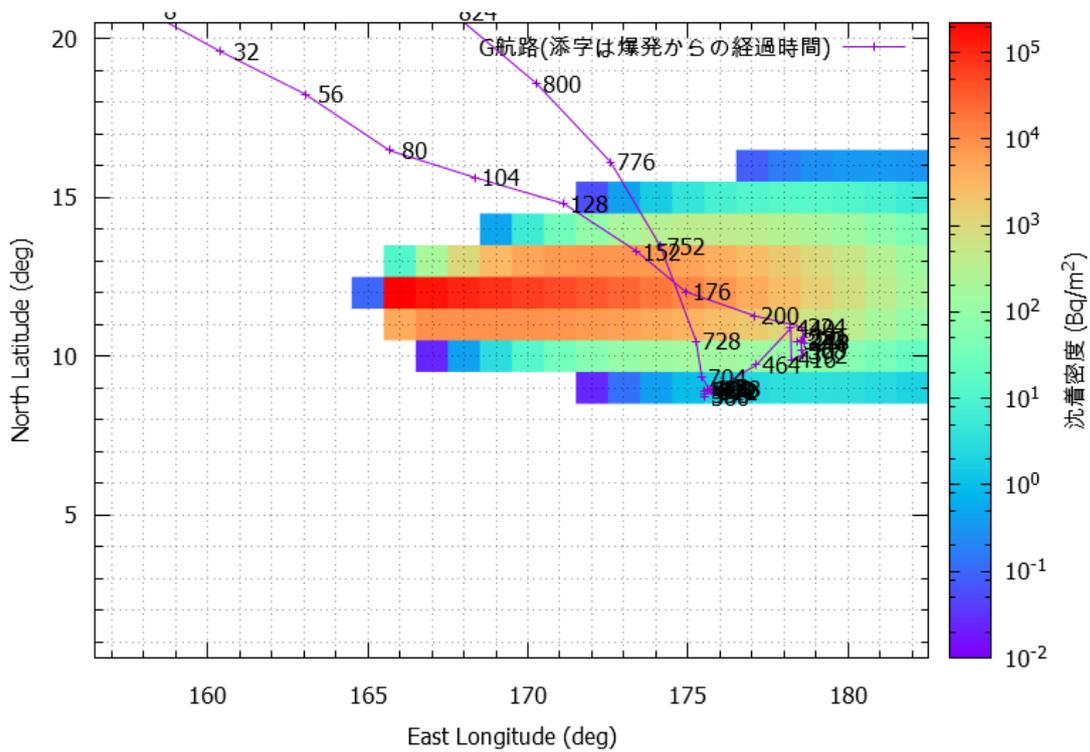


図 A4(a) ブラボー実験における局地放射性降下物成分の ^{137}Cs 沈着密度及び到着時間 (TOA) と瑞洋丸の航路

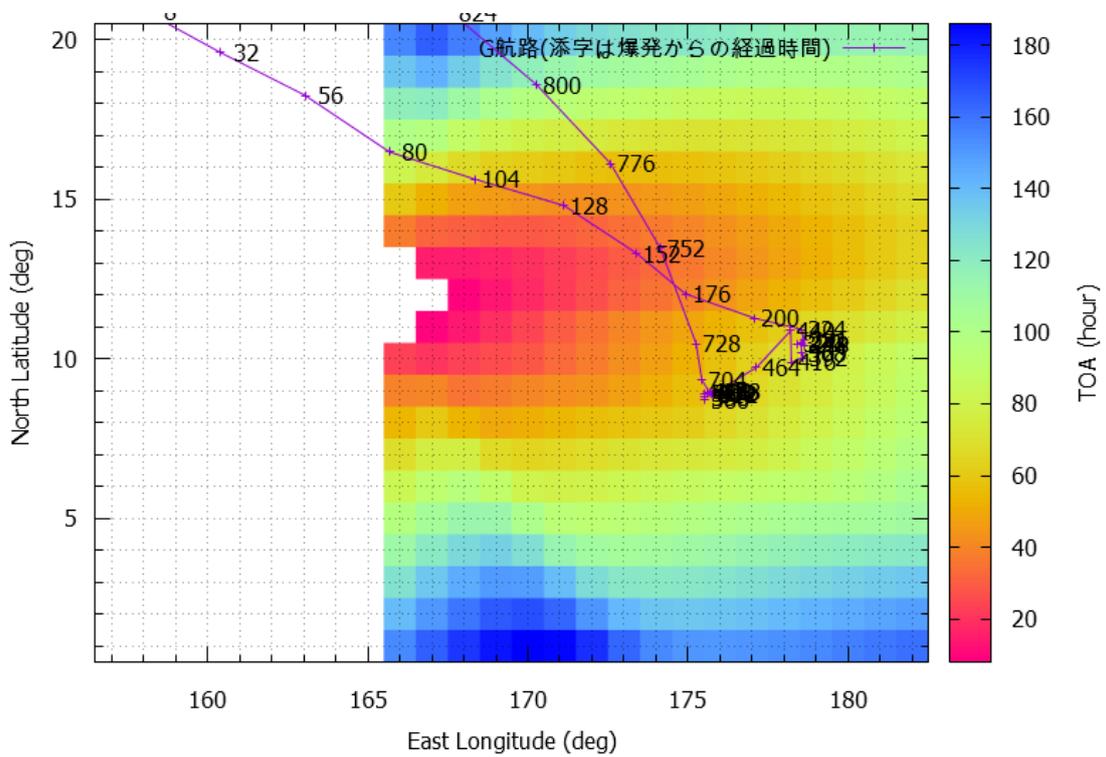
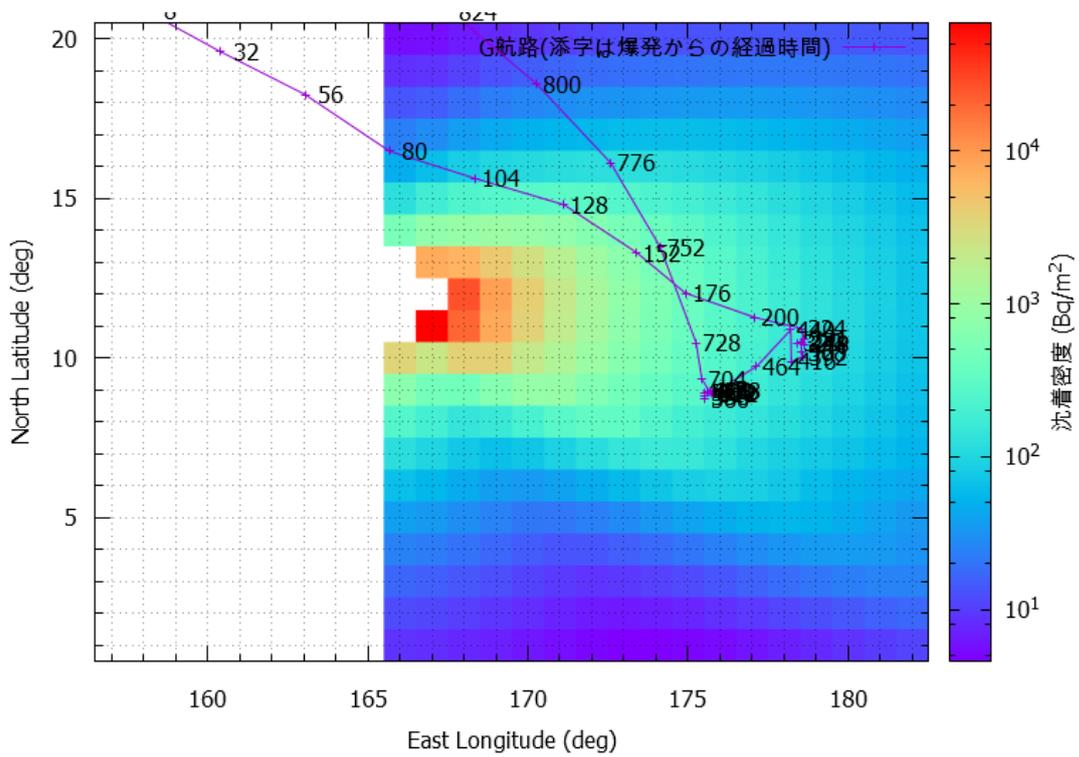


図 A4(b) ブラボー実験における対流圏放射性降下物成分の ^{137}Cs 沈着密度及び到着時間 (TOA) と瑞洋丸の航路

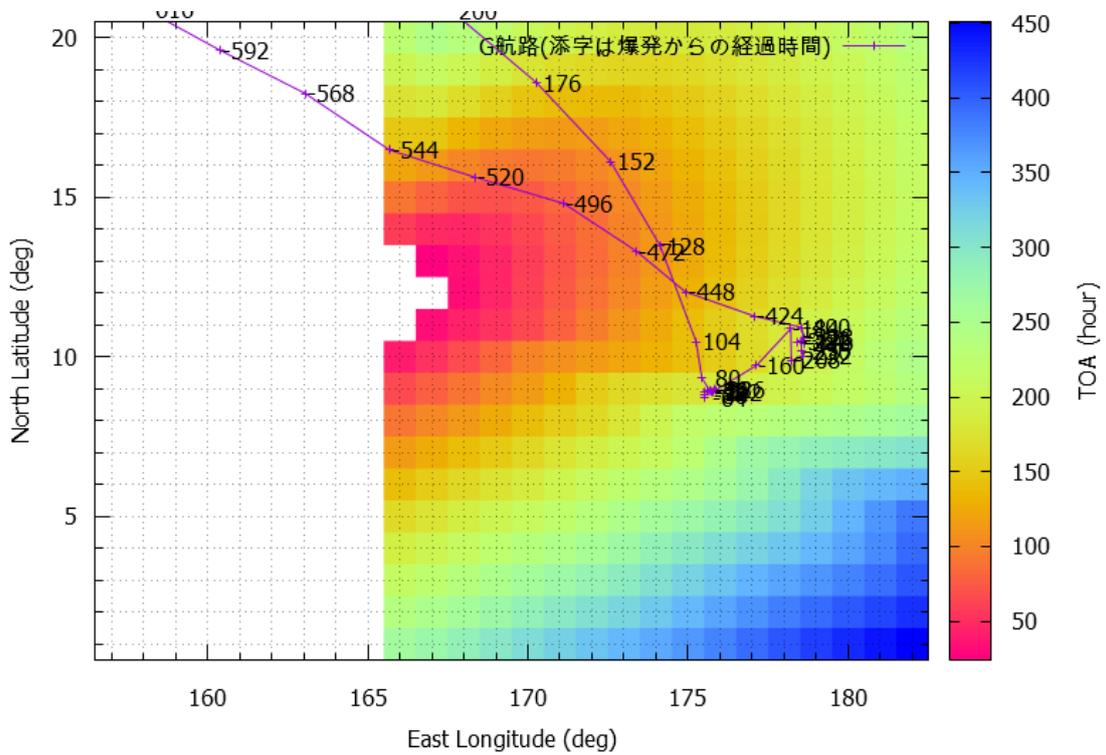
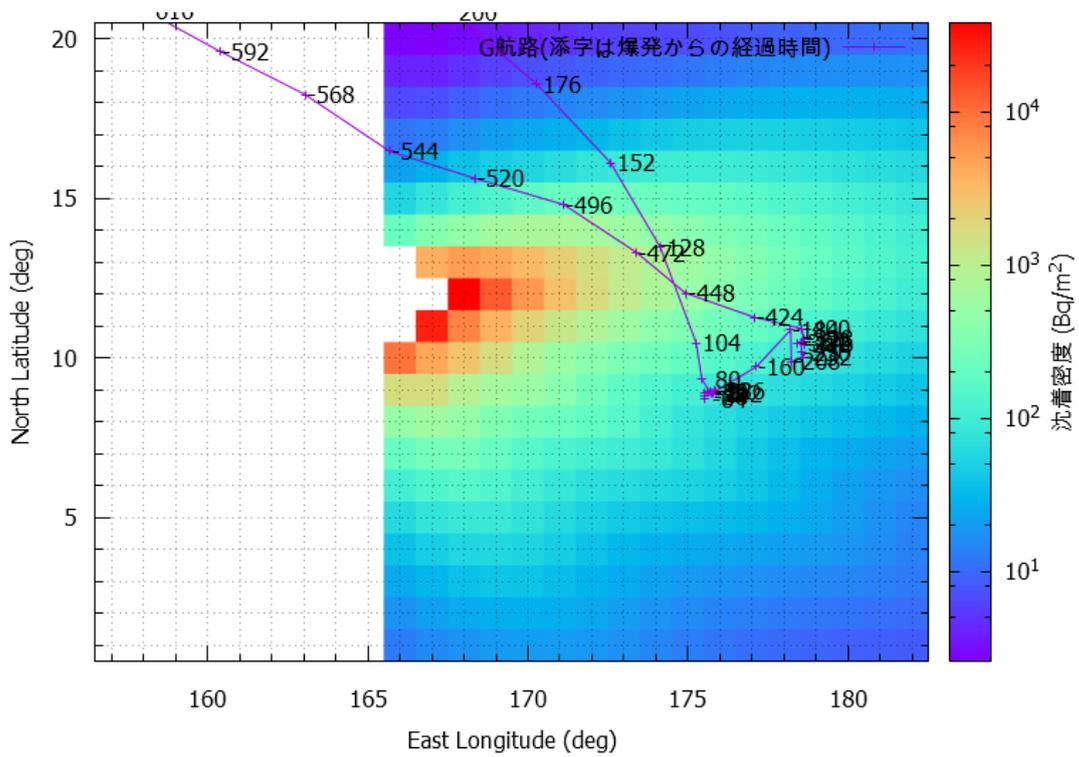


図 A5 ロメオ実験における対流圏放射性降下物成分の ^{137}Cs 沈着密度及び到着時間 (TOA) と瑞洋丸の航路

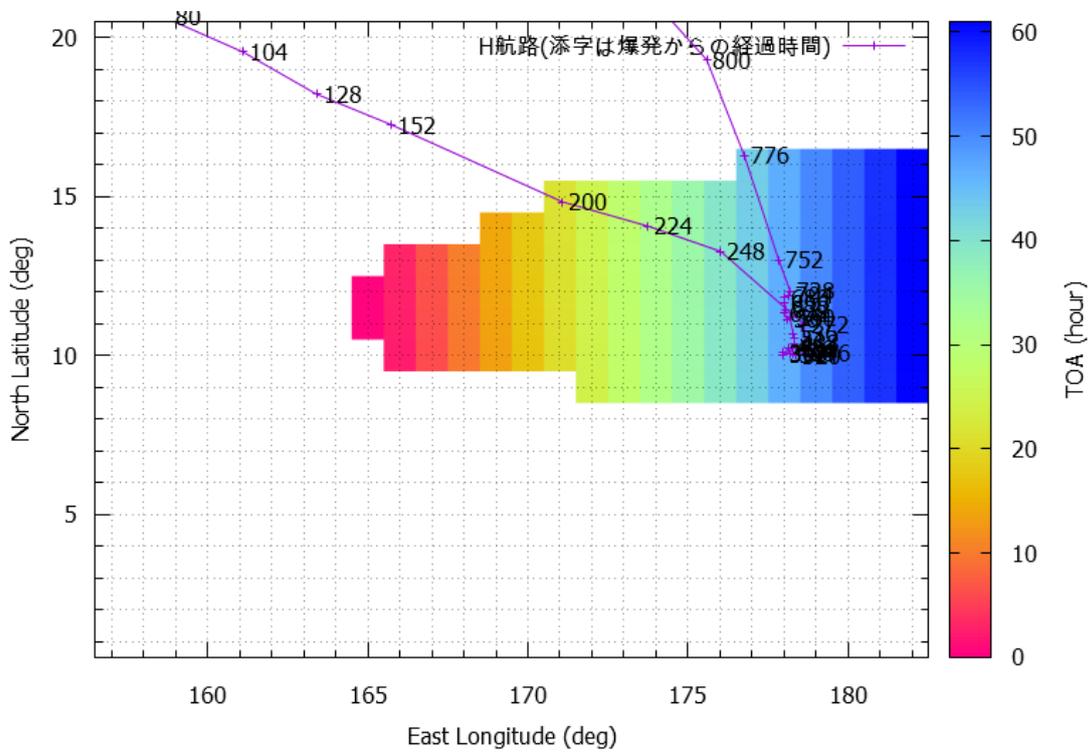
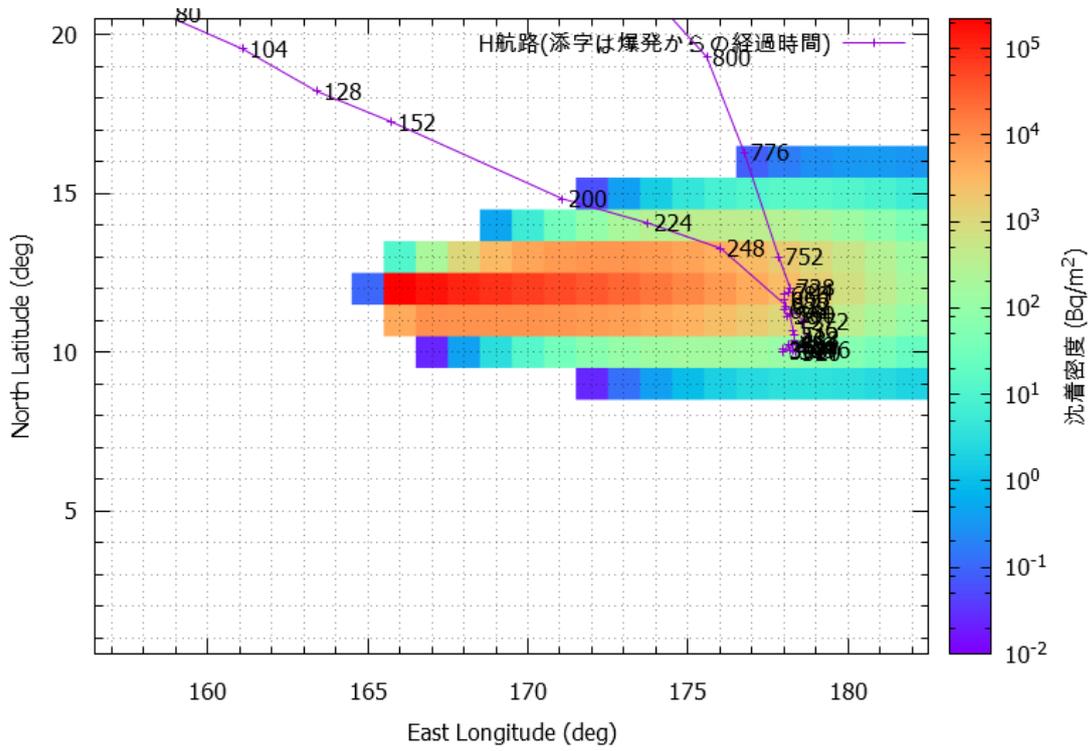


図 A6(a) ブラボー実験における局地放射性降下物成分の ^{137}Cs 沈着密度及び到着時間 (TOA) と第 12 宝幸丸の航路

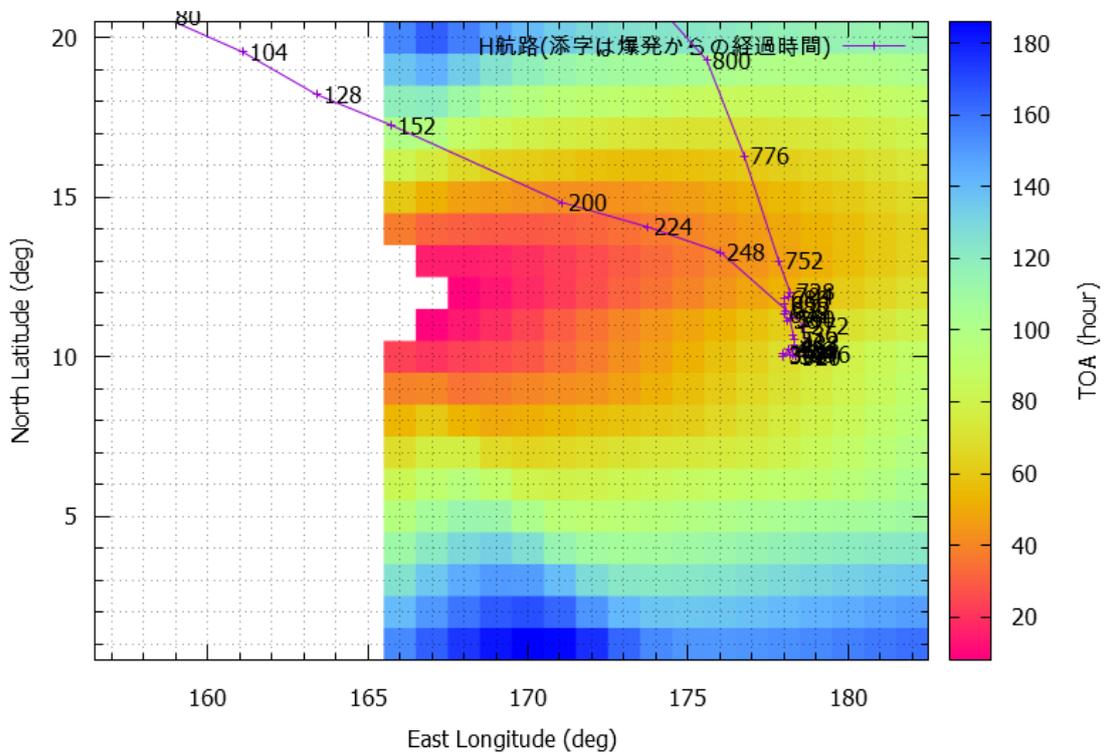
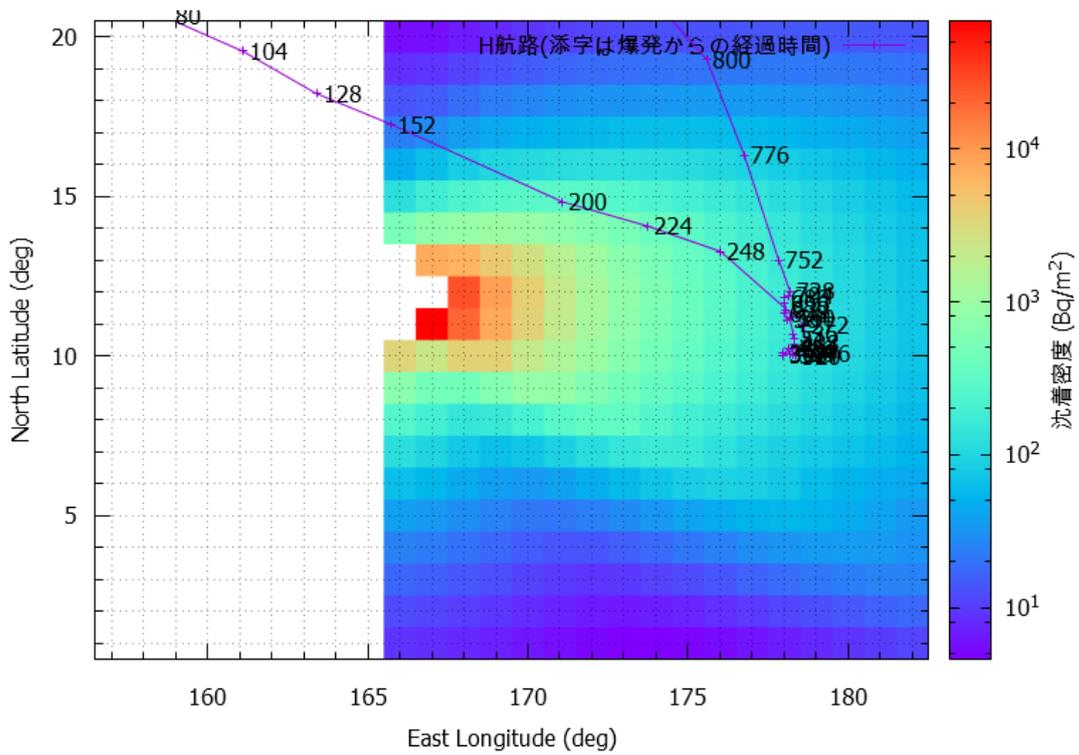


図 A6(b) ブラボー実験における対流圏放射性降下物成分の ^{137}Cs 沈着密度及び到着時間 (TOA) と第 12 宝幸丸の航路

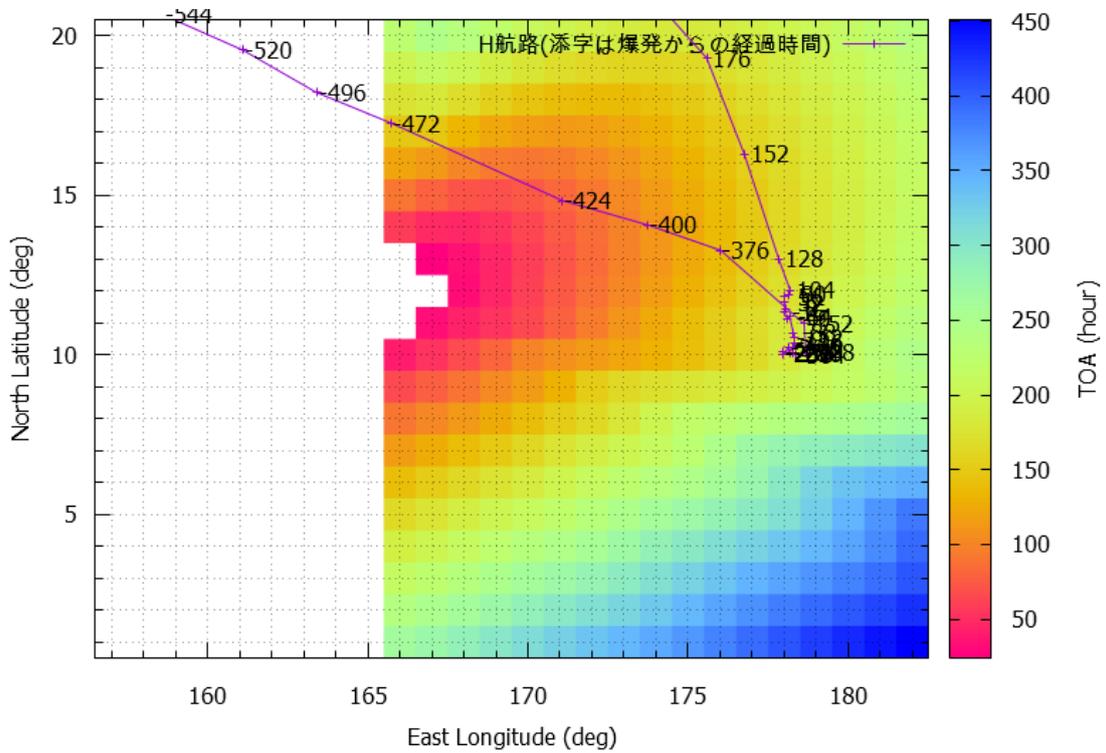
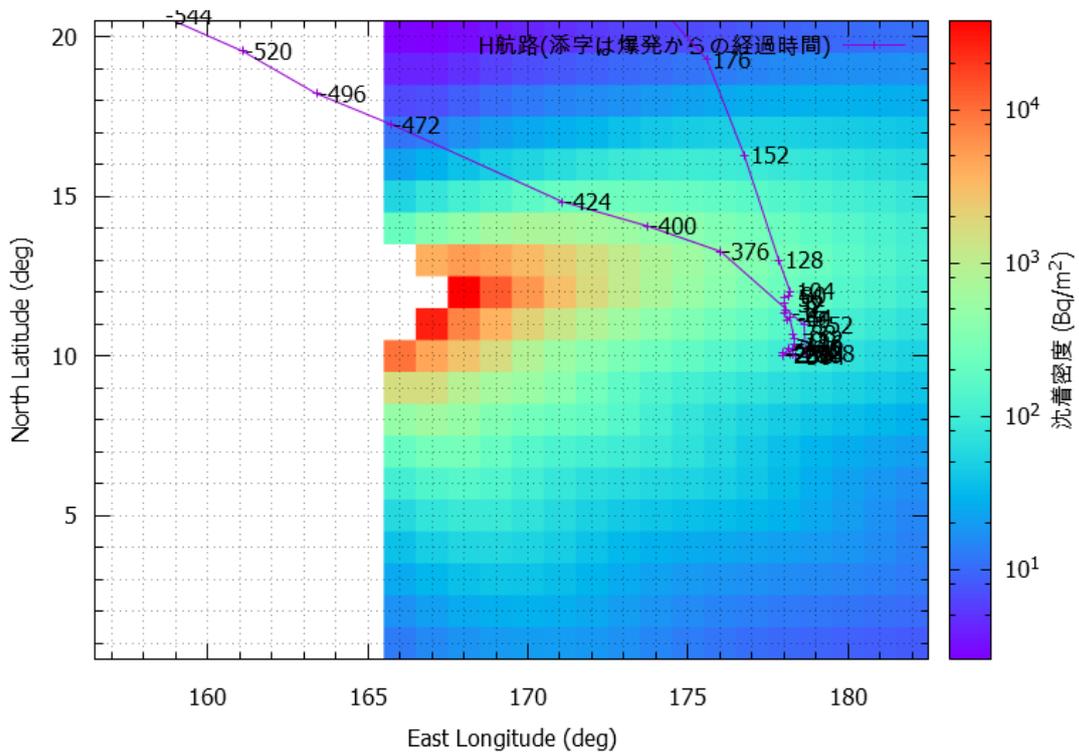


図 A7 ロメオ実験における対流圏放射性降下物成分の ^{137}Cs 沈着密度及び到着時間 (TOA) と第 12 宝幸丸の航路

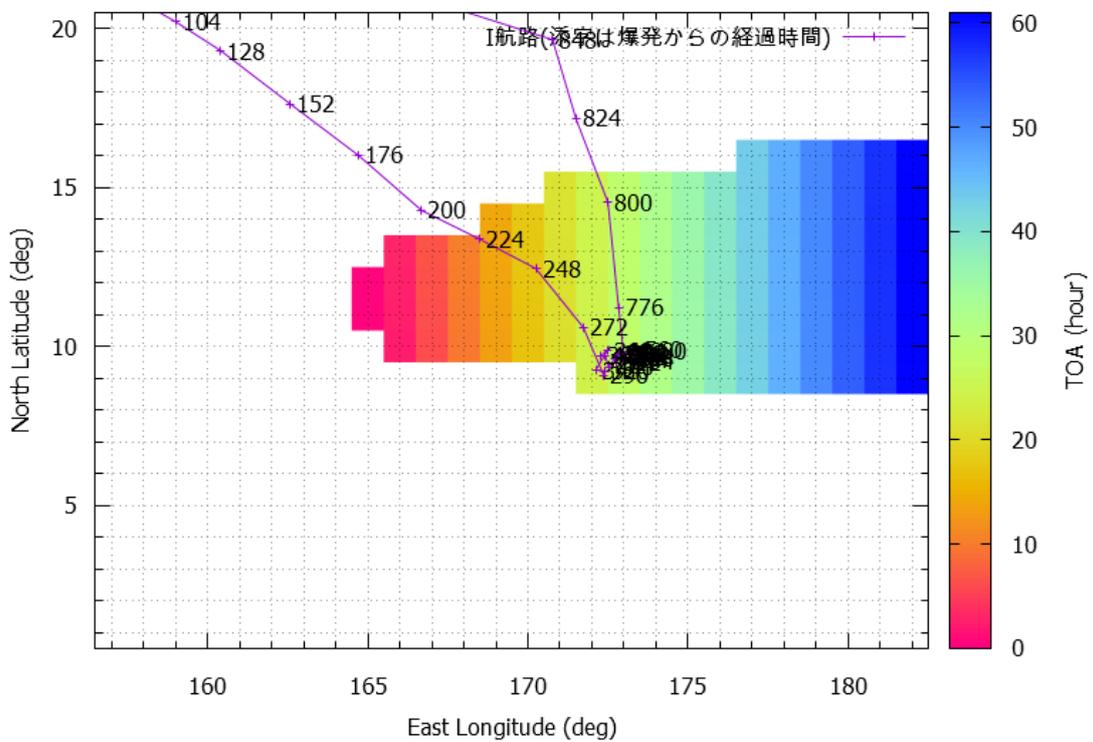
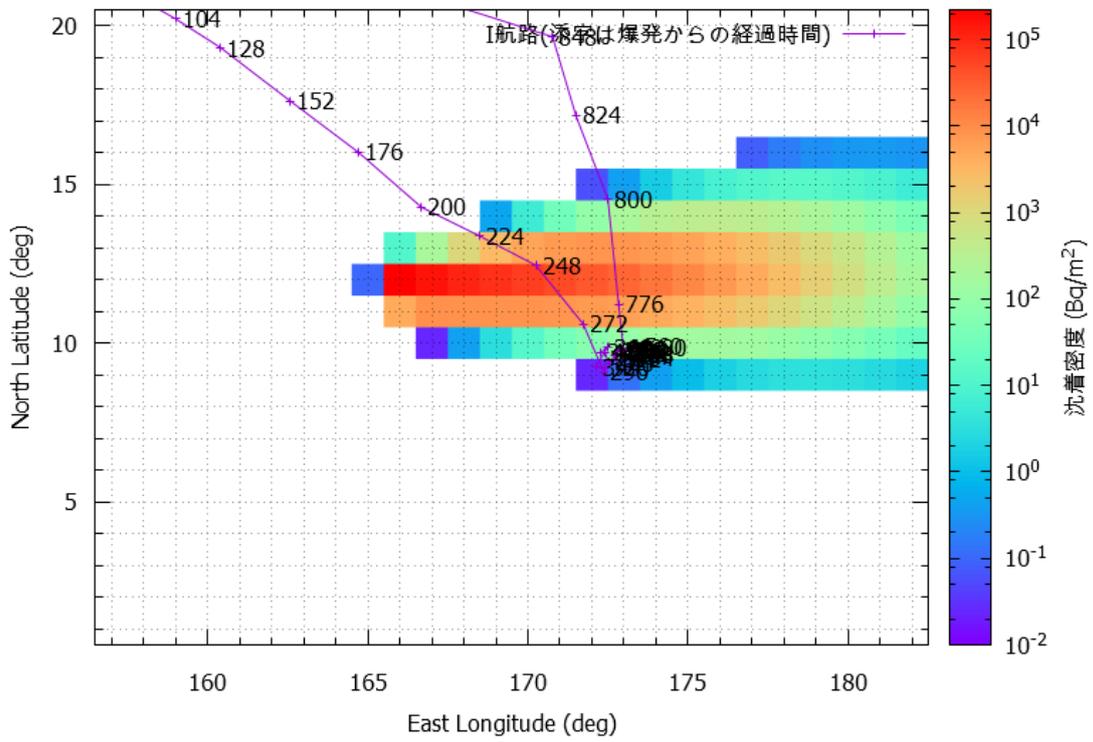


図 A8(a) ブラボー実験における局地放射性降下物成分の ^{137}Cs 沈着密度及び到着時間 (TOA) と尾形海幸丸の航路

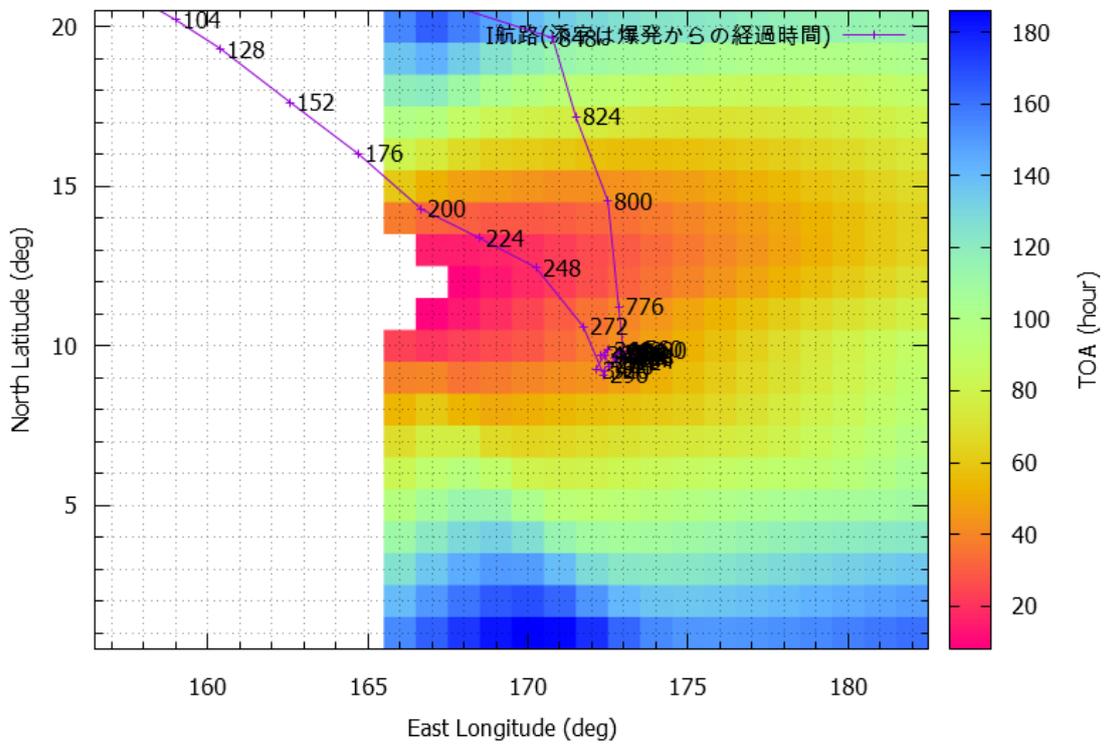
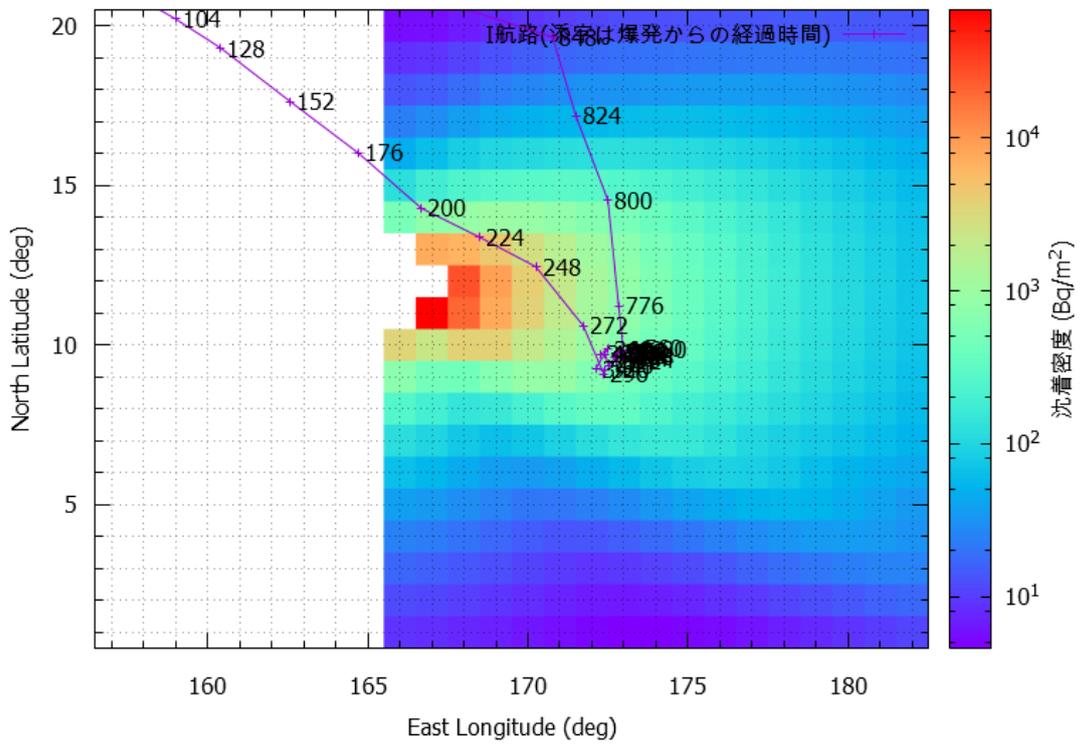


図 A8(b) ブラボー実験における対流圏放射性降下物成分の ^{137}Cs 沈着密度及び到着時間 (TOA) と尾形海幸丸の航路

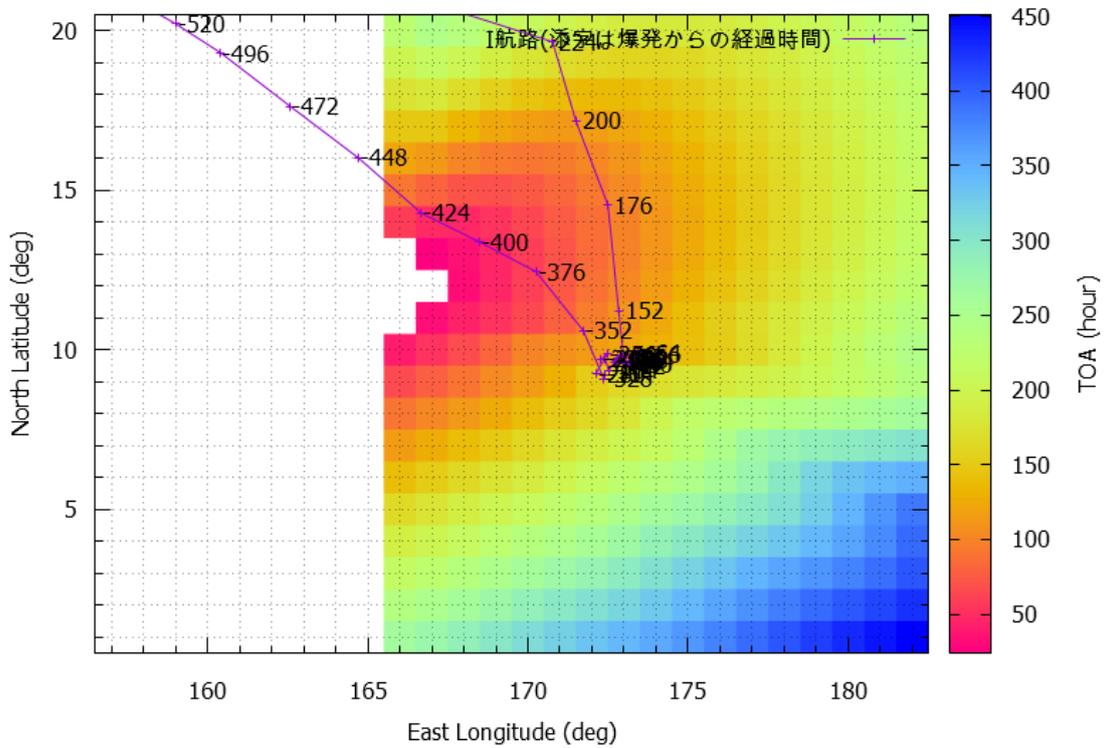
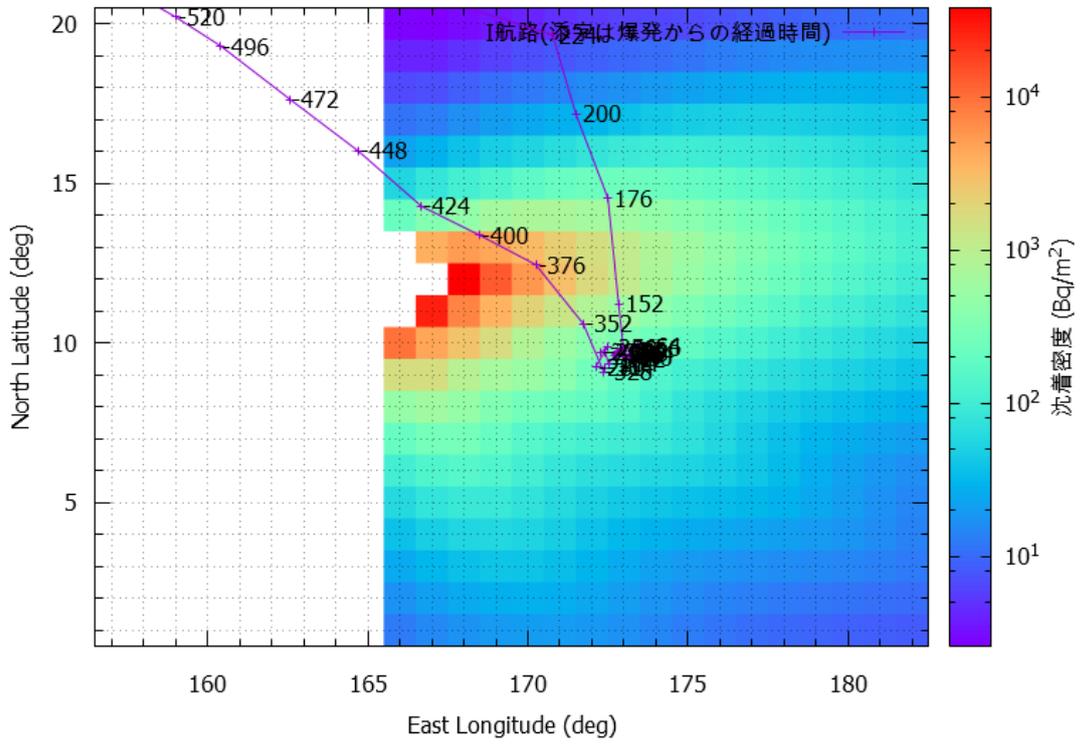


図 A9 ロメオ実験における対流圏放射性降下物成分の ^{137}Cs 沈着密度及び到着時間 (TOA) と尾形海幸丸の航路

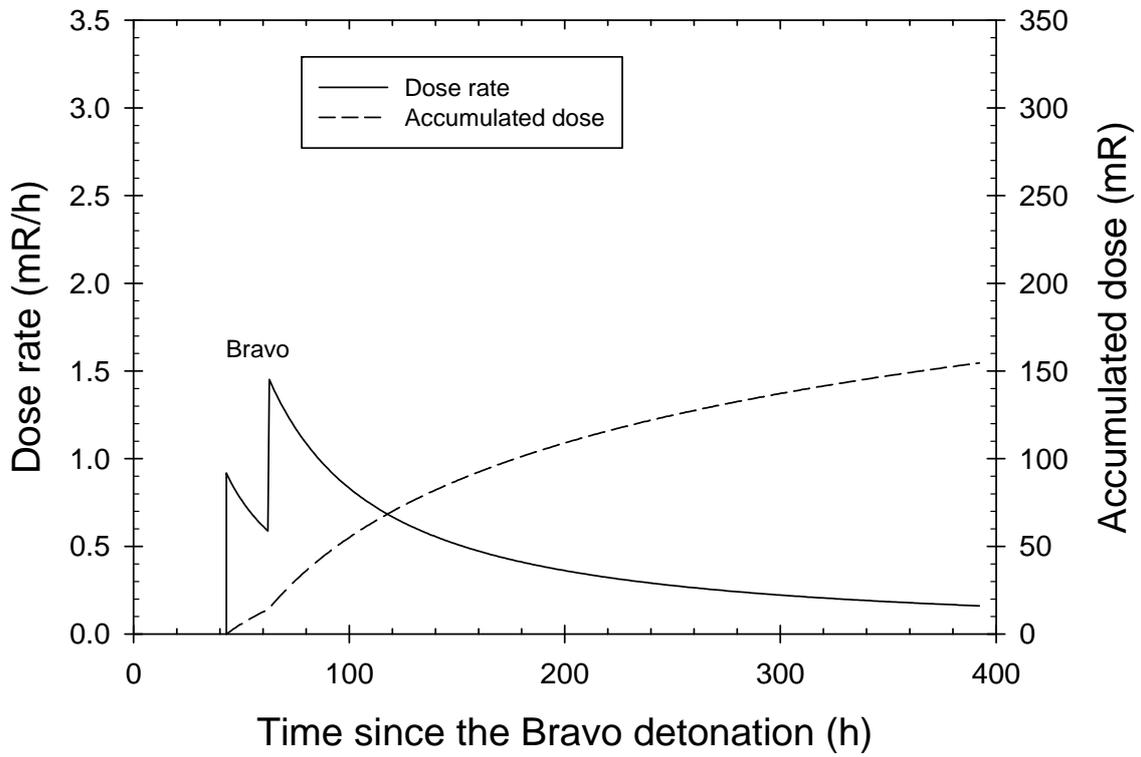


図 A10 第 12 高知丸の船上の線量率と積算線量

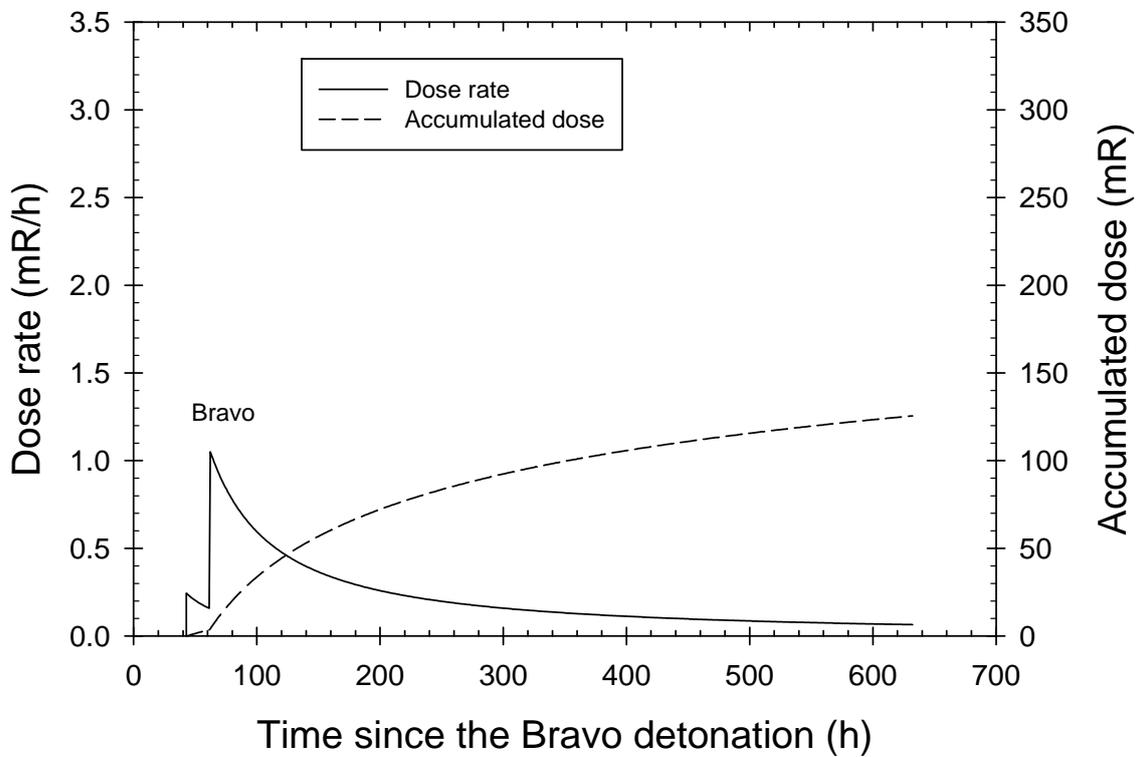


図 A11 第 5 明神丸の船上の線量率と積算線量

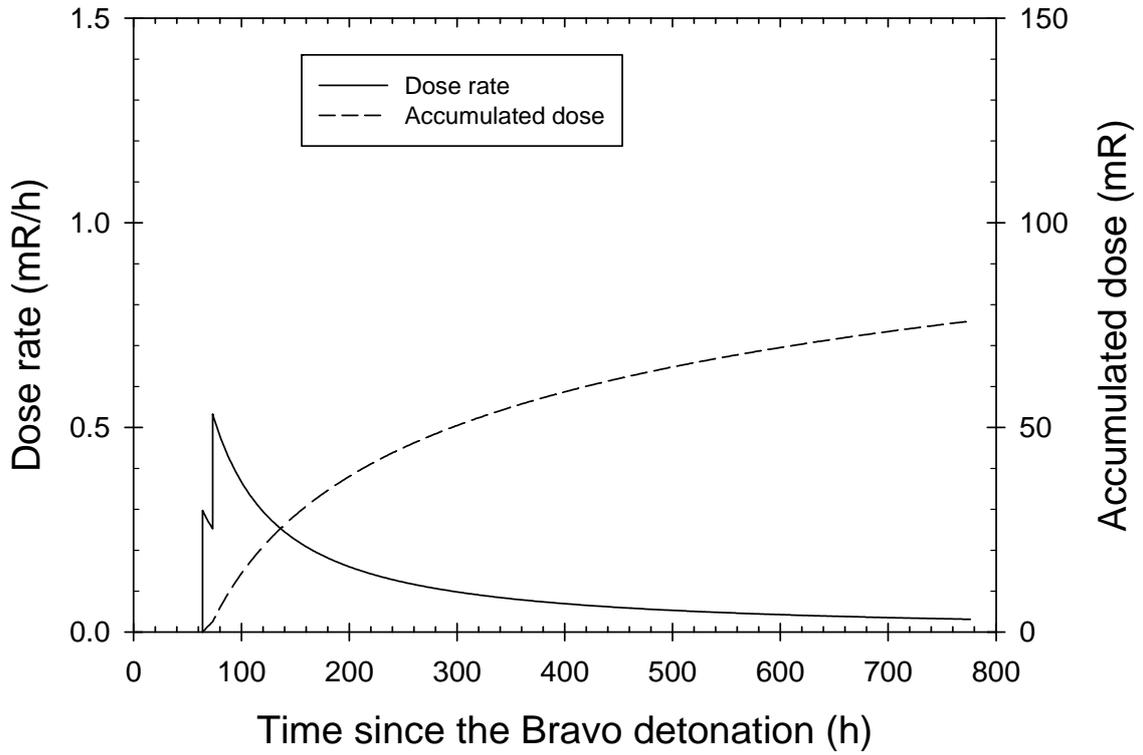


図 A12 第 10 宝成丸の船上の線量率と積算線量

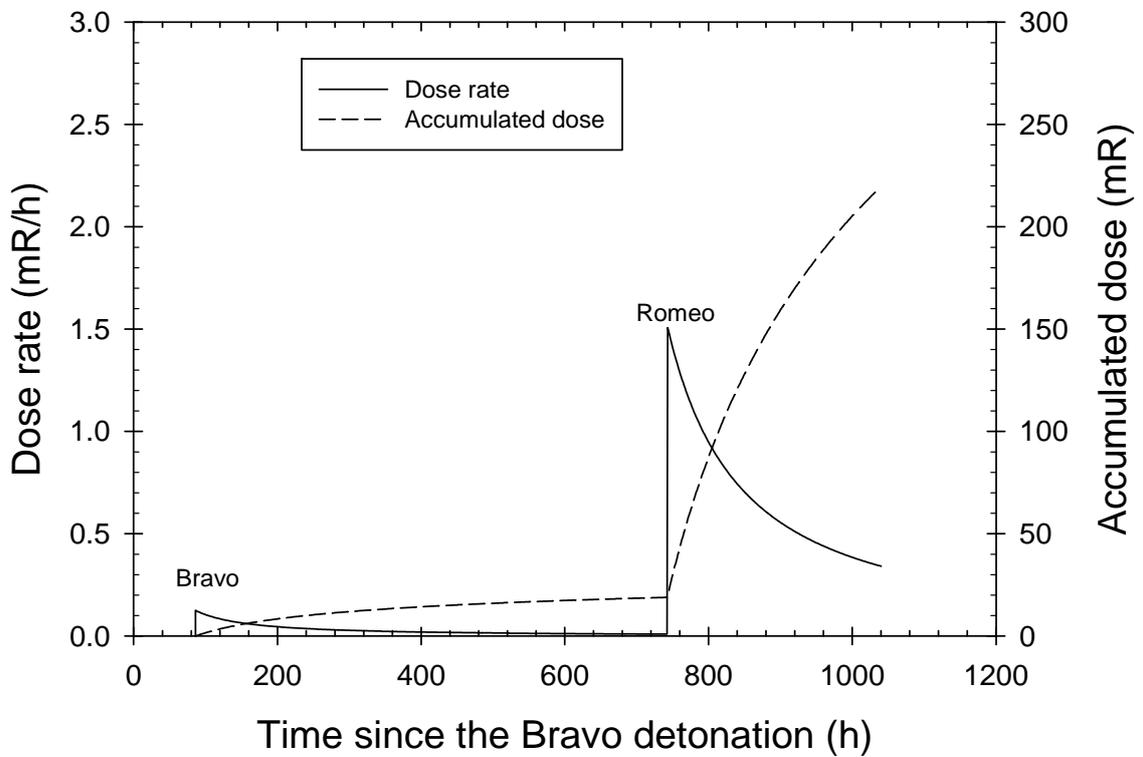


図 A13 瑞洋丸の船上の線量率と積算線量

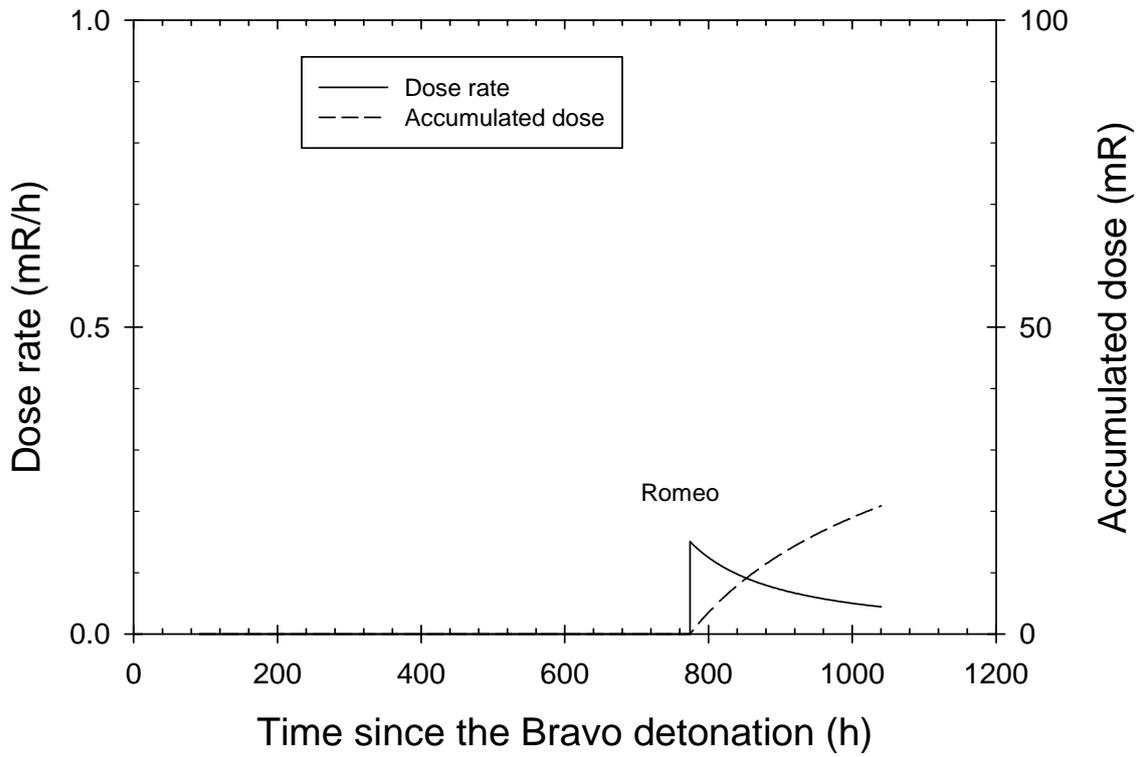


図 A14 第 12 宝幸丸の船上の線量率と積算線量

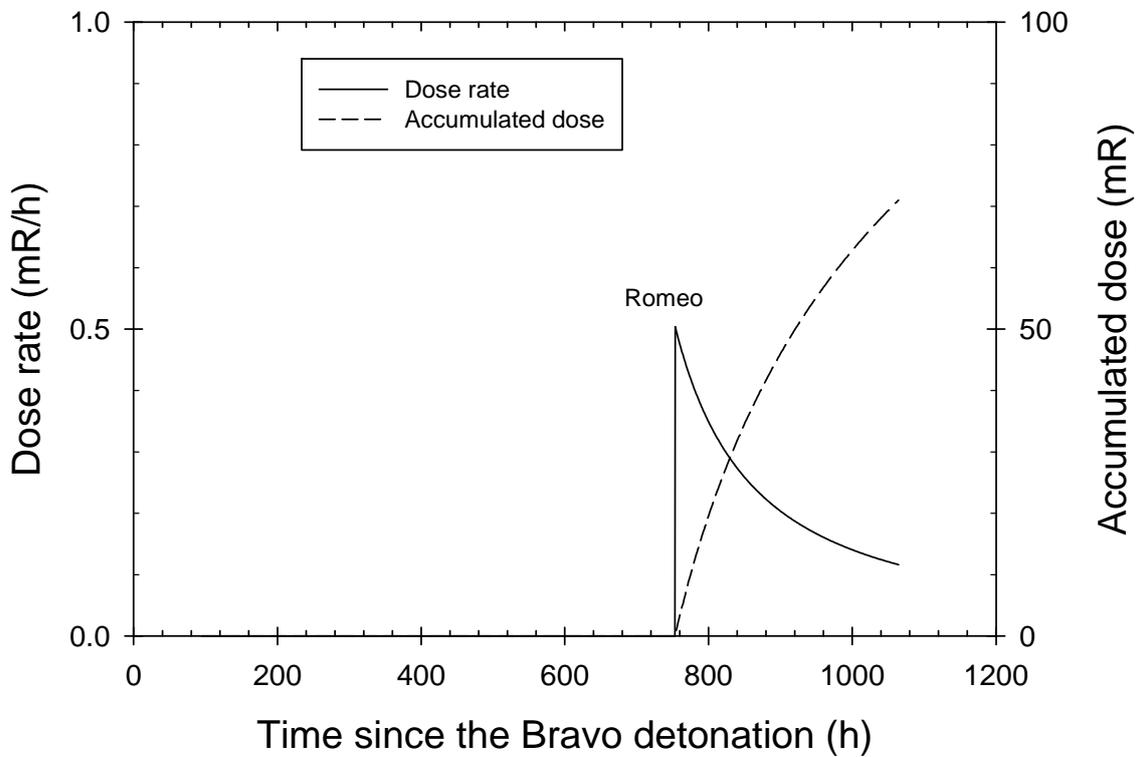


図 A15 尾形海幸丸の船上の線量率と積算線量

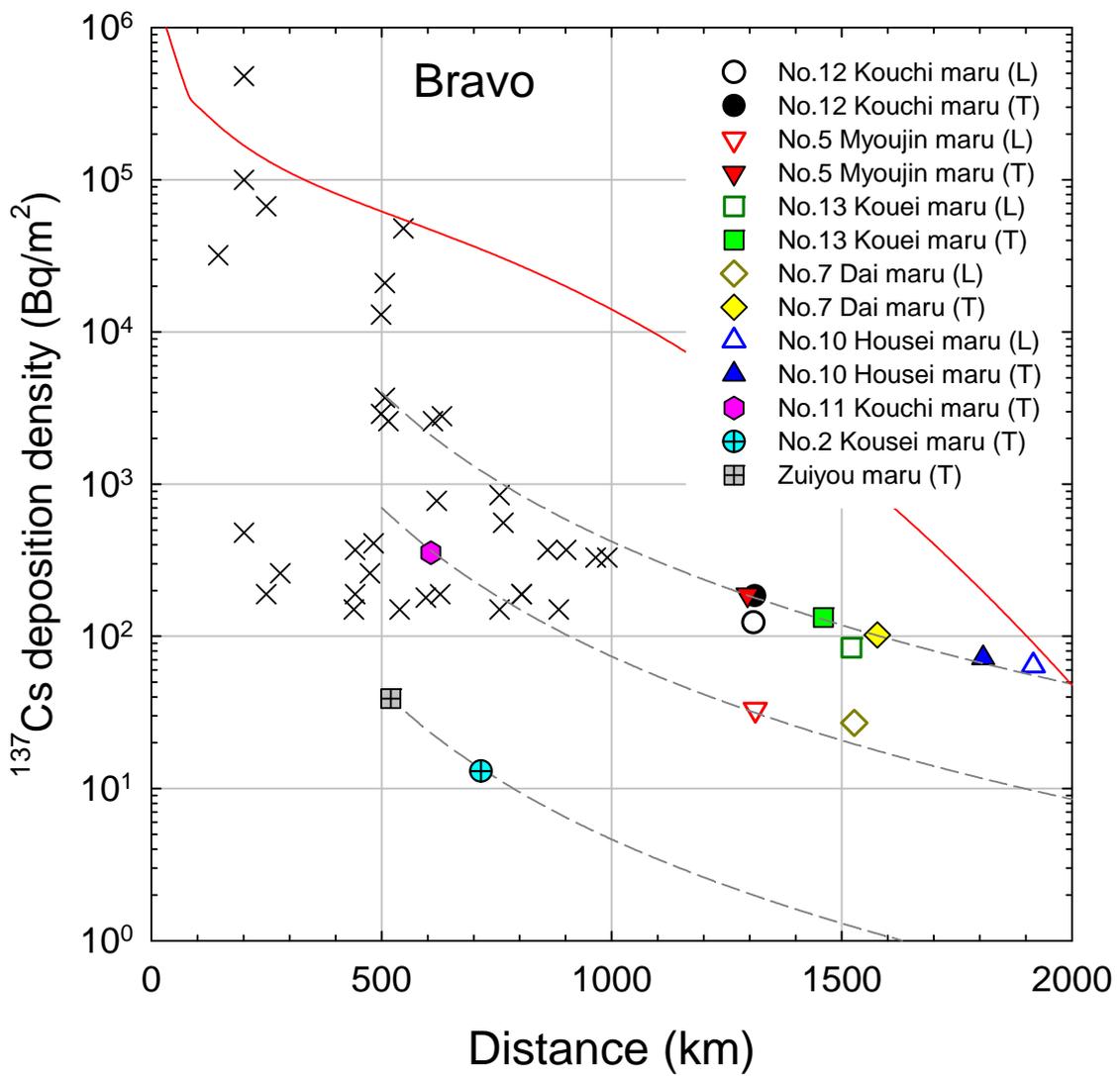


図 A16 ブラボー実験における各環礁及び各漁船の ^{137}Cs 沈着密度と
ビキニ環礁からの距離の関係

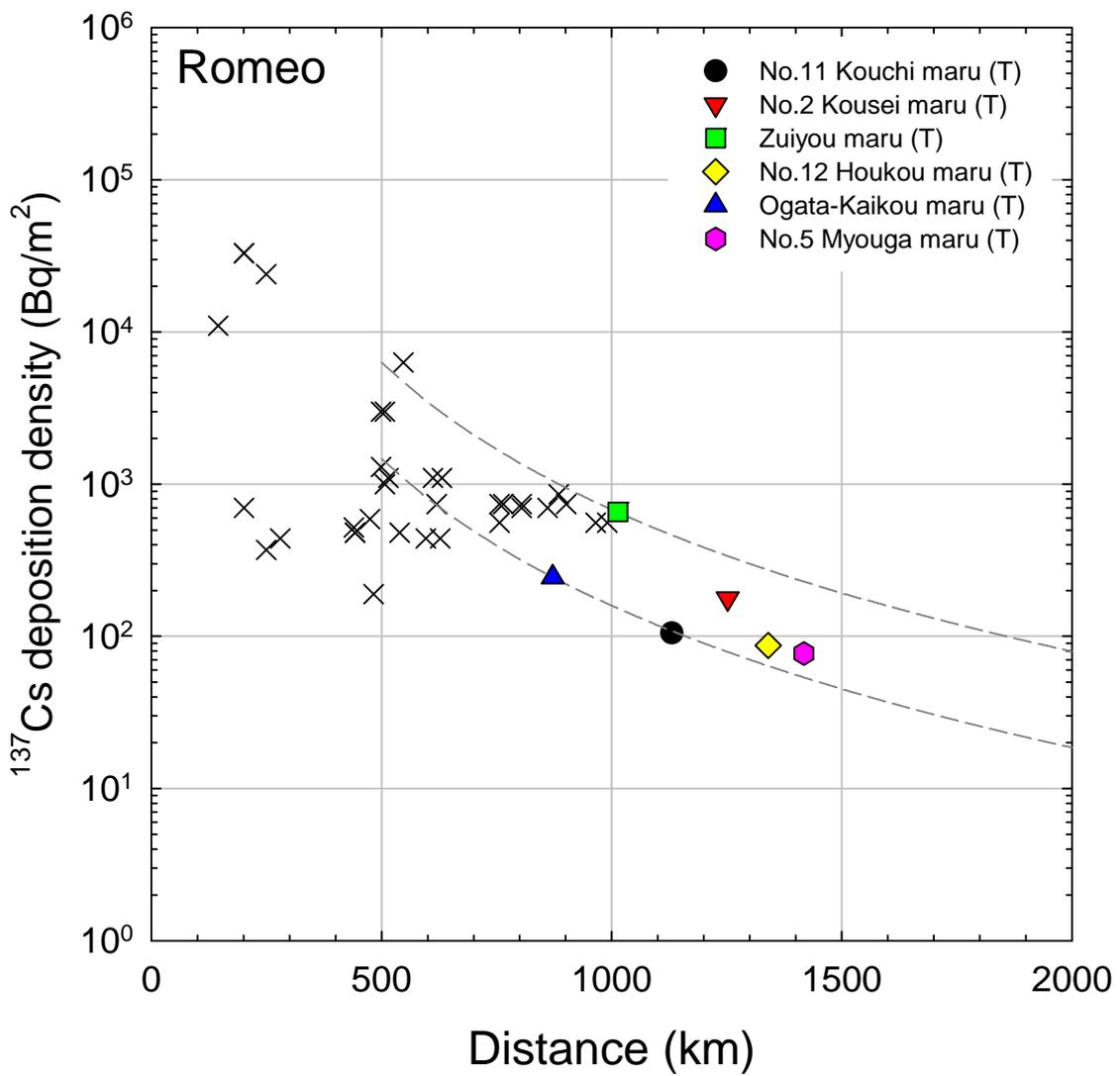


図 A17 ロメオ実験における各環礁及び各漁船の ^{137}Cs 沈着密度と
ビキニ環礁からの距離の関係

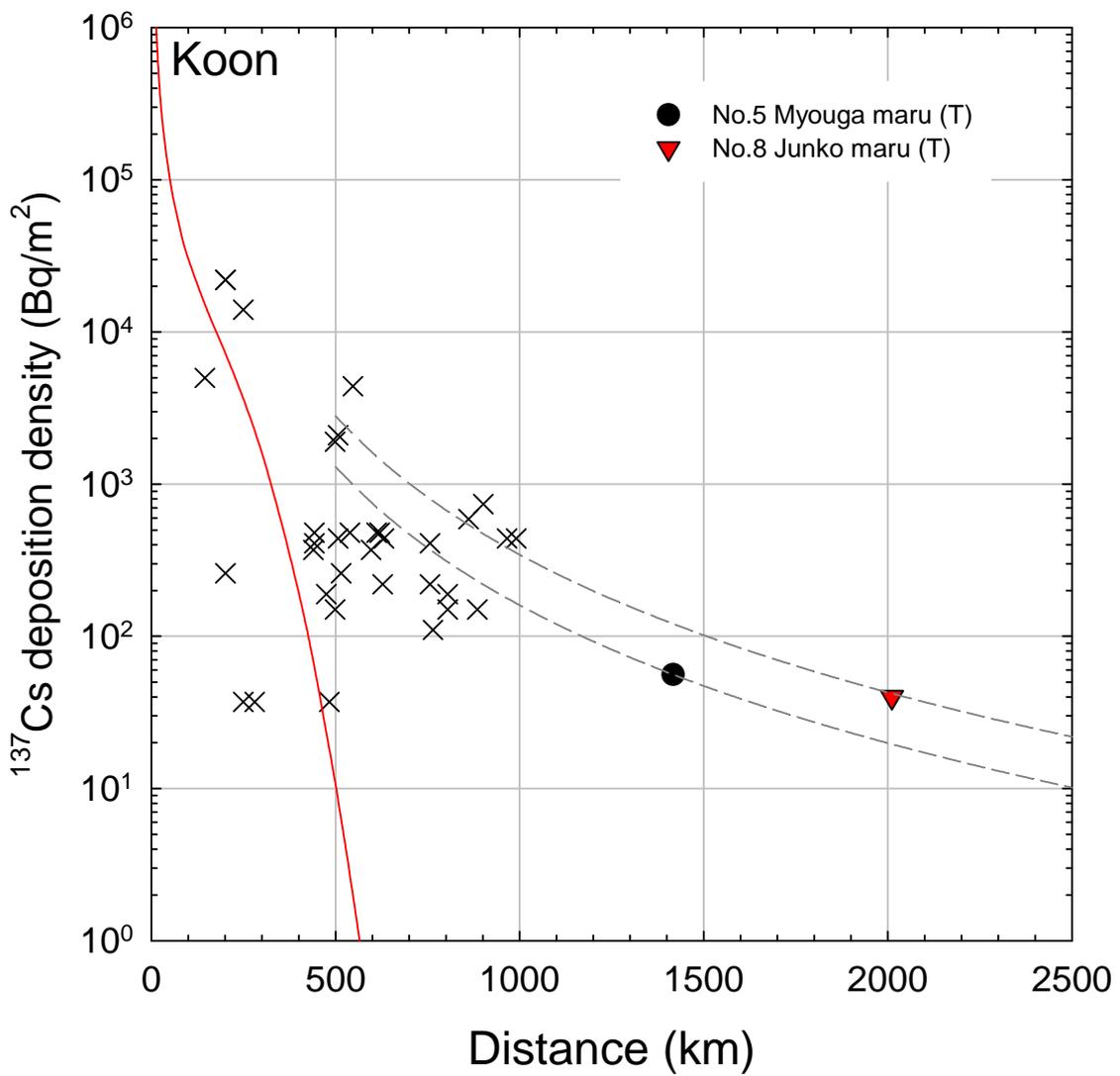


図 A18 クーン実験における各環礁及び各漁船の ^{137}Cs 沈着密度と
ビキニ環礁からの距離の関係

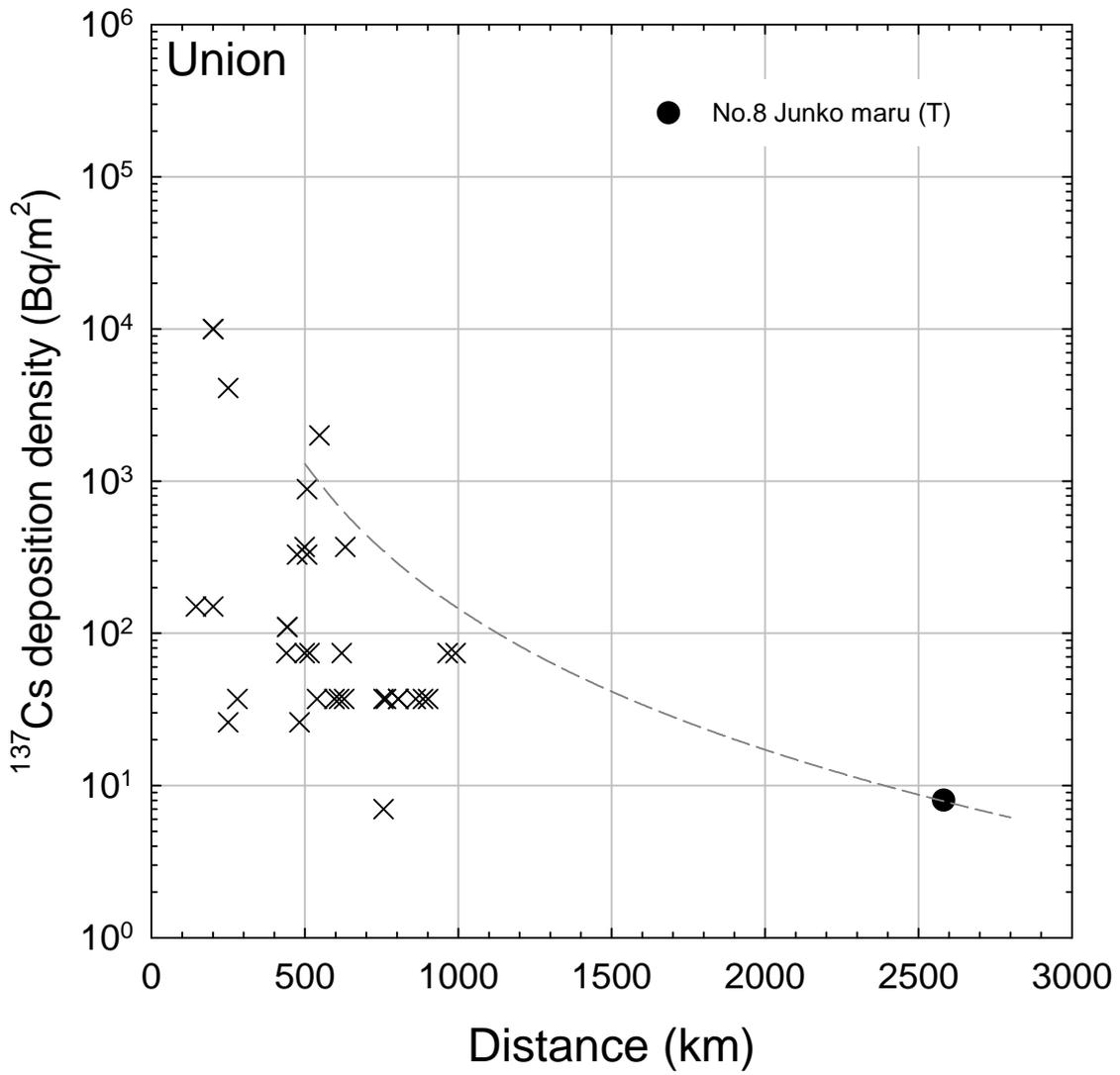


図 A19 ユニオン実験における各環礁及び各漁船の ^{137}Cs 沈着密度と
ビキニ環礁からの距離の関係

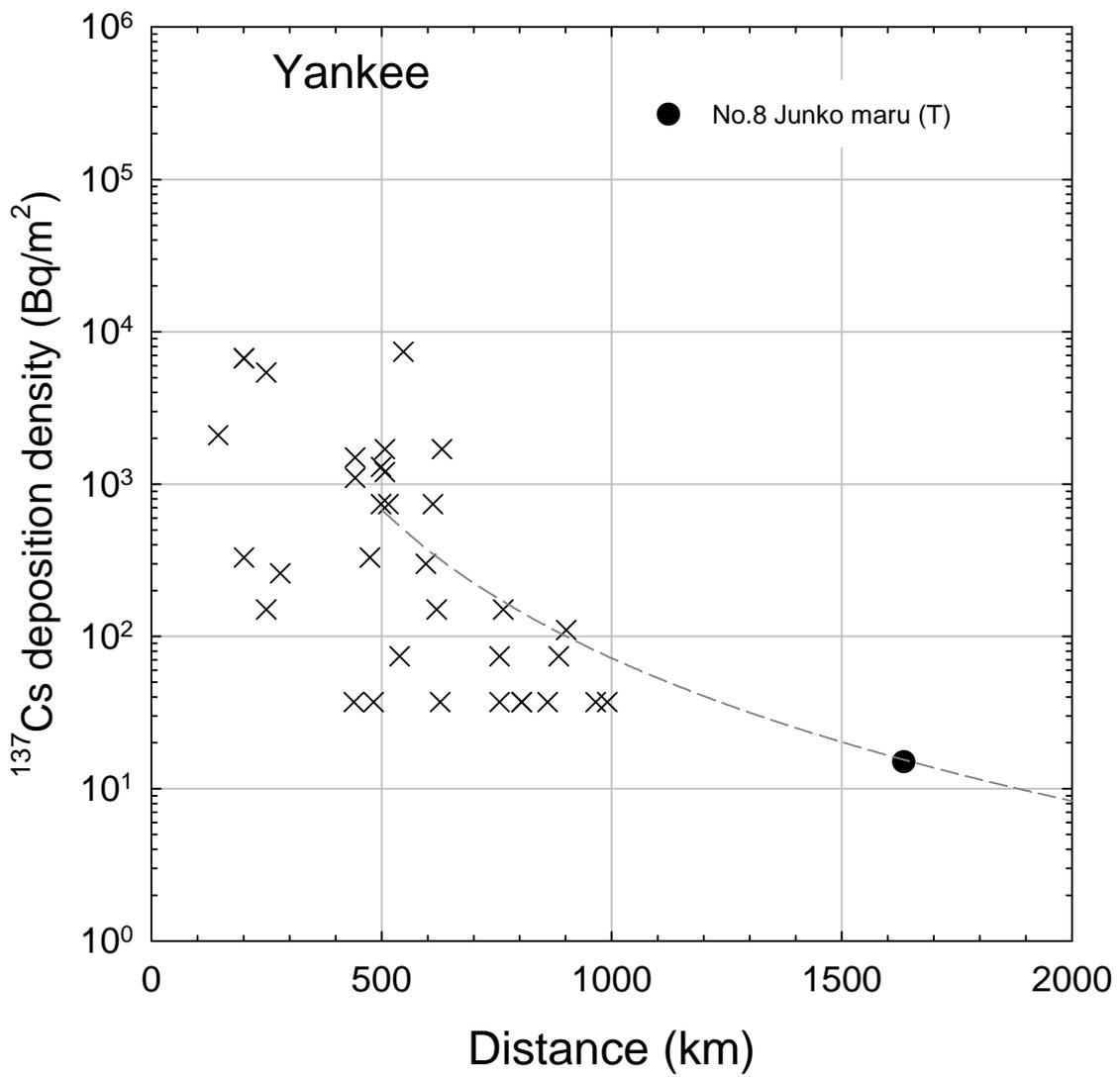


図 A20 ヤンキー実験における各環礁及び各漁船の ^{137}Cs 沈着密度と
 ビキニ環礁からの距離の関係

IV. 内部被ばくによる線量の推計

内部被ばくによる線量の推計

要 旨

昭和 29 年 3 月から 5 月にかけて行われたビキニ水爆実験によって被災したとされる漁船（第 13 光栄丸、第 7 大丸、第 11 高知丸、第 2 幸成丸、第 5 海福丸、第 5 明賀丸、第 8 順光丸及び第 1 月山丸）について、乗組員の内部被ばく線量を推計した。内部被ばくの経路として、放射性降下物の吸入摂取と汚染魚の経口摂取を仮定し、前者は外部被ばくによる線量の推計で用いられた ^{137}Cs 沈着密度から、後者は漁獲物の汚染検査の記録から内部被ばく線量を算定した。その結果、吸入摂取及び経口摂取による乗組員の内部被ばく線量の最大値は、それぞれ 0.14 mSv と 0.03 mSv（いずれも預託実効線量）と算定された。

A. 目的

昭和 29 年 3 月から 5 月にかけて米国がマーシャル諸島で実施した一連の核実験（キャッスル作戦）によって被災したとされる漁船乗組員の内部被ばく線量を推計する。ただし、推計に必要な情報が十分に得られていないため、今回は単純な仮定をおいて線量を算定する。推計の対象となる漁船は以下のとおりである。

第 13 光栄丸、第 7 大丸、第 11 高知丸、第 2 幸成丸、第 5 海福丸、第 5 明賀丸、第 8 順光丸及び第 1 月山丸。このうち、最後の第 1 月山丸については、当該海域で操業を行った期間が昭和 29 年 5 月以降であるが、帰港の際に実施された汚染検査において、漁獲物に軽微な汚染が検出されたことから、汚染魚の経口摂取による内部被ばく線量について試算した。上記漁船に関する被災状況の概要については別表 1 に示すとおりである。

B. 方法

内部被ばくの経路として、核実験によって生成される放射性降下物の吸入摂取と、

放射性核種によって汚染した魚を食することによる経口摂取を検討した。各経路で受ける内部被ばく線量の計算方法は以下のとおりである。

1. 放射性降下物の吸入摂取による内部被ばく線量

放射性降下物の空気中濃度と海上への沈着率とには次の関係がある。

$$F = v \cdot C \dots (1)$$

ここで F は沈着率 ($\text{Bq m}^{-2} \text{sec}^{-1}$)、 C は空気中濃度 (Bq m^{-3})、 v は沈着速度 (m sec^{-1}) である。一方、放射性降下物の沈着密度 A (Bq m^{-2}) と F には次の関係がある。

$$A = \int F \cdot dt = \int v \cdot C \cdot dt = v \int C \cdot dt \dots (2)$$

したがって、ある放射性核種の吸入量は次式で計算される。

$$I = \dot{B} \cdot \int C \cdot dt = \frac{\dot{B} \cdot A}{v} \dots (3)$$

ここで I は吸入量(Bq)、 \dot{B} は呼吸率($\text{m}^3 \text{sec}^{-1}$)である。内部被ばく線量は、吸入量に国際放射線防護委員会(ICRP)の刊行物に示された実効線量係数等[1]を乗じて計算される。

核種が複数存在する場合は、次式により内部被ばく線量が計算される。

$$E_{total} = \sum_i E_i = \dot{B} \sum_i \frac{A_i}{v_i} \cdot e_i$$

$$= \dot{B} \sum_i X_i = \dot{B} \sum_i \frac{X_i}{X_{137}} \cdot X_{137} \dots (4)$$

ただし、 $X_{137} = \frac{A_{137}}{v_{137}} \cdot e_{137} \dots (5)$

ここで、各諸量の添え字 i は核種を意味し、137 は ^{137}Cs を指す。 e は実効線量係数(Sv Bq^{-1})である。

(4)式を用いて内部被ばく線量を計算するには、①核実験後の経過時間を関数とする核種組成、②各核種の実効線量係数、③沈着速度、④呼吸率が必要となる。これらについて、①については UCRL-53505[2] に示された 61 核種(後述する Simon らが評価対象とした 63 核種からデータの無い ^{239}Pu 、 ^{240}Pu を除く。)の沈着密度(ブラボー実験に対するもの)、②については、空気力学的放射能径 $1 \mu\text{m}$ 及び呼吸器官から血中への吸収クリアランス区分を基本的にタイプ M (ただし、ヨウ素などの一部の核種についてはタイプ F とした)とした条件の各核種の実効線量係数、③については、放射性降下物が湿性沈着により降下したと仮定し、 $0.07 (\text{m sec}^{-1})$ を文献[3]から引用した。④の呼吸率は成人男性に対する値として $2.57 \times 10^{-4} (\text{m}^3 \text{sec}^{-1}) = (22.18 \text{ m}^3 \text{ per day})$ を用いた[4]。

対象となる漁船が放射性降下物に遭遇する時刻(TOA: Time of Arrival)とその位置での ^{137}Cs 沈着密度については、本研究と併行して行われた外部被ばく線量の推計(本報告書を参照)で算定された結果を用いた。それを表 1 に示す。TOA が得られれば ^{137}Cs に対する他核種の沈着密度(相対値)が求まるが、計算上は TOA ではなく摂取した時刻(TOI: Time of Intake)とした。TOI は Simon ら[5]にならい、TOA の 1.4 倍とした。

表 1 各漁船の TOA(h)と ^{137}Cs 沈着密度(Bq m^{-2})

船舶名	核実験	TOA	^{137}Cs 密度
第 13 光栄丸	ブラボー	50	84
		70	130
第 7 大丸	ブラボー	50	27
		76	100
第 11 高知丸	ブラボー	39	360
	ロメオ	170	100
第 2 幸成丸	ブラボー	120	13
	ロメオ	160	180
第 5 海福丸	—	—	—
第 5 明賀丸	ロメオ	180	77
	クーン	67	56
第 8 順光丸	クーン	100	40
	ユニオン	170	8
	ヤンキー	75	15

注) 第 13 光栄丸と第 7 大丸は上段の数値が局地放射性降下物、下段の数値が対流圏放射性降下物に対するもの。第 5 海福丸は放射性降下物に遭遇しないため該当なし。第 1 月山丸は操業期間が昭和 29 年 5 月以降であるため表に含めず。

2. 汚染魚の経口摂取による内部被ばく線量

推計の対象となる各漁船は、帰港の際に実施された漁獲物汚染検査の記録が残されており、端窓式 GM 計数管(当時)の計測値として 50~9000 cpm 程度の数値が記録さ

れている。それを表2に示す。こうした結果から、汚染した魚を食したことにより内部被ばくを受けたとの懸念が聞かれる。以下に、汚染魚の経口摂取による内部被ばく線量の計算方法の手順を述べる。

表2 各漁船の汚染検査結果(cpm)

船舶名	検査結果	備考
第8 順光丸	8962	サメヒレ
第13 光栄丸	6050	サメヒレ
第5 明賀丸	246	ビンナガ
第2 幸成丸	48	同上
第7 大丸	90	同上
第5 海福丸	500	同上
第11 高知丸	160	同上
第1 月山丸	250	クロカジキ

注) 検査結果は最大値のみを記載

(1) 核種組成の推定

マグロ等の汚染検査が昭和29年12月を以って中止された根拠は、魚体内に含まれる放射性核種の大半が許容値の高い⁶⁵Znであることと、可食部となる筋肉部分の濃度が他部位に比べて低いためであった[6]。

汚染魚中の放射性核種に関しては、当時の分析結果から⁶⁵Znの他、⁵⁴Mn、⁵⁵Fe、⁵⁹Fe、⁸⁹Sr、⁹⁰Sr、^{113m}Cd、^{115m}Cd、¹⁴⁰Ba、¹⁴⁰Laが検出されている[7-12]。ただし、これらの放射性核種の経口摂取による内部被ばく線量係数(実効線量係数)は、高い順に⁹⁰Sr(2.8E-08 Sv Bq⁻¹)、^{113m}Cd(2.3E-08 Sv Bq⁻¹)、⁶⁵Zn(3.9E-09 Sv Bq⁻¹)と続くが、前述のとおり検出された放射性核種の大半が⁶⁵Znであること、またSr以外の核種については1954年時点では極めて微量と考えられることから、⁶⁵Zn、⁹⁰Sr、⁸⁹Srの3核種のみが内部被ばく線量に寄与したと仮定した。⁸⁹Srを含めたのは、昭和54年12月15日に分析を行ったNagasawaらの結果[13]において筋肉中

の全放射能に対するSrが0.27%(内0.2%が⁹⁰Sr、残りが⁸⁹Sr)との報告があるためである。物理半減期の短い⁸⁹Srは、推計の対象となる漁船(第1月山丸を除く)が操業していた昭和29年3月から5月にかけては、その放射能が⁹⁰Srより大きかったことが考えられる。昭和54年12月15日時点での⁶⁵Zn、⁹⁰Sr、⁸⁹Srの放射能比を99.73%、0.20%、0.07%とし、物理半減期を考慮して同年3月15日時点での放射能比を計算すると98.31%、0.09%、1.60%となる。ただし、全体の割合としては⁶⁵Znが大半を占めるため、3核種の放射能比で加重した実効線量係数は⁶⁵Zn単体の場合とほぼ同じになる。

(2) 魚体内の放射能濃度

当時の魚の汚染検査は、魚体表面から10cmの距離での端窓式GM計数管の計数値を測定することで行われ、100cpmが基準値(バックグラウンドによる寄与を含む)とされた[14]。魚体表面での計数値と筋肉中の比放射能の関係はIshikawaとHiyama[14]によって調べられており、個々の測定間のばらつきはあるものの、マグロ表面から10cmの計数値が1000cpmのとき、筋肉中での比放射能を約1Bq/g(wet)に相当することが示された。筋肉以外の部位については、天野ら[15]の報告にもあるとおり、腎臓、肝臓、幽門などの臓器において高い放射能が検出されているが、乗組員がこれらの部位のみを食べ続けたかは不明であるため、必要に応じて天野らの結果(別表2)を参考にすることとし、本報告ではマグロ類の通常の可食部となる筋肉を、操業開始から帰港までの間、毎日300g食すると仮定して線量を算定した。

(3) 計数値の補正

表2に示す検査結果は各漁船が帰港した際の汚染検査で得られたものであるため、

摂取期間中の計数率に補正する必要がある。ただし、この補正に必要な情報が乏しい。よって、ブラボー実験が行われた3月1日を起点とした核実験後の線量率に関する経験式 ($t^{-1.2}$) を適用し、操業開始日及び操業終了日における計数率を検査結果から計算し、操業期間中は操業開始日の計数率、操業終了から帰港までは操業終了日の計数率が持続すると仮定して、それぞれの期間の線量を計算した。

C. 結果

前述した方法で計算した結果を表3に示す。

表3 各漁船の実効線量(mSv)

船舶名	吸入摂取	経口摂取
第8 順光丸	0.01	0.03*
第13 光栄丸	0.05	0.03*
第5 明賀丸	0.02	0.01
第2 幸成丸	0.02	0.001
第7 大丸	0.03	0.01
第5 海福丸	—	0.03
第11 高知丸	0.14	0.02
第1 月山丸	—	0.02

注) 吸入摂取について、第5 海福丸と第1 月山丸は放射性降下物に遭遇しないため、計算値はない。経口摂取について、第8 順光丸と第13 光栄丸はサメヒレのデータであるため、残りの船舶の中で最も高い第5 海福丸の漁獲物検査結果 (500 cpm) から求めた推計値を用いた。

D. 考察

1. 放射性降下物の吸入摂取

Simon ら(2010) [5]によるマーシャル諸島民の内部被ばく線量の推計では、放射性降下物の吸入摂取による内部被ばくは微量であるとして考慮していない。核実験が行われたビキニ環礁から比較的近い島々 (ロングラップ島など) では、100 μm 程度の粒径

を有する局地放射性降下物によるばく露であったため[16]、吸入摂取は考えにくく、経口摂取が現実的な摂取経路と考えられる。第5 福竜丸乗組員に見られるように、局地放射性降下物による内部被ばくは著しく線量が高くなる場合があるが[17]、各漁船の¹³⁷Cs 沈着密度はいずれも低く、キャッスル作戦の全ての実験による放射性降下物を考慮したマジュロ島やクェゼリン島の評価値に比べても低い[18]。

他方、今回推計の対象となる漁船のほとんどは、放射性降下物に遭遇した時間帯にはビキニ環礁から 1000 km 以上離れた東方の海域を航行していたと考えられる。粒径の大きい局地放射性降下物は遠方には到達しないため、比較的小さな粒径を有する放射性降下物のみが、高層の偏西風によって東側海域に移流し、降雨等により各漁船の甲板上に降下した可能性が考えられる。ビキニ環礁から約 500 km 離れたウチリックに到達した放射性降下物の粒径は平均 10 μm [16]であり、それ以遠では粒径がより小さくなることが予想される。しかしながら、Simon らが考察するように、降雨中の放射性降下物の吸入摂取の寄与が顕著になるとは考えにくい。

今回用いた吸入摂取による内部被ばく線量の推計方法は、WHO が福島原発事故に被災した住民の線量推計に用いた方法と基本的に同じものであるが、放射性降下物の沈着速度に強く依存するため、算定された線量は大きな不確かさを有する。今後必要に応じて、各パラメータの確率分布を考慮した確率論的な線量評価などを検討することが考えられる。

表4には、経口摂取を主体とした Simon らの島民に対する内部被ばく線量の推計結果を示した。この内、各漁船の航路図から、マーシャル諸島の東端に位置するマジュロの推計値が比較対象として適当と思われる。

ただし、これらの推計値は、キャスル作戦の全ての実験による線量を考慮している。したがって、マジュロの推計値に比較して、各漁船の線量は相当低くなるはずである。しかしながら、今回の推計には大きな不確かさを含むため、今後必要に応じて、詳細な物理過程を考慮した三次元大気拡散シミュレーションにより、放射性降下物の低層域の時系列大気中濃度マップを構築し、各漁船の航路図と照合することでより正確な線量推計を行うことなどが考えられる。

表4 Simon らによるマーシャル諸島民の初期の内部被ばく線量(mSv)の推計結果

島	内部被ばく線量
マジュロ	0.6
クェゼリン	0.4
ウチリック	90
ロンゲラップ	1,400

注) Simon ら[5]の Table 11にある甲状腺、赤色骨髄、胃壁、結腸にそれぞれの組織加重係数を乗じて計算。ただし、残りの全組織の吸収線量を4組織の吸収線量の平均値とし、その組織加重係数には1から4組織分を除いた数値(0.59)を与えた。また、放射線荷重係数は1とした。Simon らは実効線量を評価していないので、前述のとおり計算した結果を実効線量の近似値と見なし、本推計結果と比較した。

2. 汚染魚の経口摂取

汚染魚に関する当時の状況を要約すると以下のとおりである。

- 第5福竜丸がブラボー実験の放射性降下物に被災して帰港した直後から漁獲物の汚染検査が実施され、基準値を超過した場合には廃棄処分とされた。
- 魚の汚染は、初期は体表に多く検知され、4月中旬頃より内臓の汚染の割合が高くなり、汚染の程度も高くなった。

7月下旬から9月中旬にかけて、さらに汚染の程度の高い魚が見つかった。

- 俊鷲丸による当該海域の調査が実施され、魚体内の放射能分布や核種分析が行われた。その結果、可食部(肉)の汚染は低く、放射能の大半は中性子放射化により生成された⁶⁵Znであることが判明した。⁸⁹Sr/⁹⁰Srの全放射能に占める割合は僅かであった。これらの知見を踏まえ、汚染検査は昭和29年12月下旬に終了した。
- 1956年にも俊鷲丸による調査が行われ、魚体内に⁵⁴Mn、⁵⁵Fe、⁵⁹Fe、^{113m}Cd、^{115m}Cd、¹⁴⁰Ba、¹⁴⁰Laが検出された。

今回の推計の対象となった漁船の多くが操業していた昭和29年3月から4月上旬の時点では、魚体の汚染は表面に集中し、内部への取り込みは少なかったことが予想される。推計に用いた魚表面と筋肉の計数率の関係は、魚体内における汚染が顕著となった頃に得られたものであるため、経口摂取の推計には過大評価が見込まれる。

昭和29年3月に行われた木羽らによるマグロ表面の分析[19]では、放射性核種の大半はウロコに付着していたことが確認されている。同分析では、¹⁴⁰Ba、⁸⁹Sr、⁹⁰Sr、¹³²Te、⁹⁵Srなどの核種が検出されたが、これらは不溶性の状態で存在していたことが報告されており、魚体表面に付着した核種が調理の際に魚肉に一部移行したとしても、経口摂取を介した内部被ばくは微量であったと思われる。

一方、魚体内に取り込まれた放射性核種の核種組成は、組織の違いや漁獲時期によって異なることが予想される。Nagasawa ら[13]のSrの分析は、タイショウ丸が昭和29年6月に漁獲したキハダマグロの筋肉(分析結果が得られたのは同年12月)について得られたもので、当時の汚染検査の中止の

根拠とされたが、限定的な結果であり、この点はさらに調査、検討する必要があると思われる。

その他、放射能濃度が高い魚の内臓を食べたとする証言もあるが[20]、汚染検査で数100 cpm程度であれば、表3の結果から1 mSvを超えるような状況は考えにくいと思われる。

E. 結論

昭和29年3月から5月にかけて行われたビキニ水爆実験によって被災したとされる漁船（第13光栄丸、第7大丸、第11高知丸、第2幸成丸、第5海福丸、第5明賀丸、第8順光丸及び第1月山丸）について、放射性降下物の吸入摂取、及び、汚染魚の経口摂取による乗組員の内部被ばく線量（実効線量）を推計した。この結果、前者による内部被ばく線量の最大値は0.14 mSv、後者による内部被ばく線量の最大値は0.03 mSvとなった。いずれの数値も大きな不確実性が見込まれるものの、1 mSvを超える可能性は低いと予想される。

F. 参考文献

- [1] ICRP, 2012. Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. Ann. ICRP 41(Suppl.).
- [2] Hicks, H. G., 1984. Results of calculations of external gamma radiation exposure rate from local fallout and the related radionuclide compositions of selected U.S. pacific events. UCRL-53505. Lawrence Livermore National Laboratory.
- [3] World Health Organization, 2012. Preliminary dose estimation from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan earthquake and Tsunami.
- [4] ICRP, 1994. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP

Publication 66. Ann. ICRP 24 (1-3).

[5] Simon, S.L., Bouville, A., Melo, D., Beck, H. L., Weinstock R, M., 2010. Acute and chronic intakes of fallout radionuclides by Marshallese from nuclear weapons testing at Bikini and Enewetak and related internal radiation doses. Health Phys. 99, 157-200.

[6] 三宅康雄, 檜山義夫, 草野信男. 2014. ビキニ水爆被災資料集, 東京大学出版会. (434頁, 厚生省公衆衛生局長 衛発第 384 号 昭和 29 年 12 月 28 日)

[7] 佐伯誠道, 岡野真治, 森高次郎. 1955. 放射性汚染魚の放射性物質. 日本水産学会誌, 20, 902-906.

[8] 山田金次郎, 戸沢晴己, 天野慶之, 高瀬明. 1955. 放射能汚染魚に関する研究—III. ^{65}Zn の確認について. 日本水産学会誌, 20, 921-926.

[9] 佐伯誠道, 白井和雄, 大野駿, 森高次郎. 1957. 放射能汚染魚類の放射性物質—II. 1656年の太平洋における放射能汚染カツオ(その1). 日本水産学会誌, 22, 645-650.

[10] 白井和雄, 佐伯誠道, 大野駿. 1957. 放射能汚染魚類の放射性物質—III. 1956年の太平洋における放射能汚染カツオ(その2) $^{113\text{m}}\text{Cd}$ の存在について. 日本水産学会誌, 22, 651-653.

[11] 白井和雄. 1958. 放射能汚染魚類の放射性物質—IV. 分属分析による汚染メバチの放射性物質の分析. 日本水産学会誌, 23, 723-728

[12] 佐伯誠道. 1958. 放射能汚染魚類の放射性物質—V. イオン交換樹脂による汚染メバチ“肝臓”の放射性物質の分析. 日本水産学会誌, 23, 729-734.

[13] Nagasawa, K., Kawashiro, I., Nakayama, G., Kashima, T., Serizawa, J., Ohkuma, S., Kawamura, S., Nishizaki, S. 1956. Results of investigations and examinations on the influences upon sea food in Japan caused by the

hydrogen bomb experiments at Bikini atoll, 1954. Research in the effects and influence on the nuclear bomb test explosion-II. 895-916, Japan Society for the Promotion of Science, Ueno, Tokyo.

[14] Ishikawa, R., Hiyama, Y. 1956. Some notes on the radioactivity of the contaminated fishes”, Research in the effects and influences of the nuclear BOMB test explosion. *ibid.* 883-888.

[15] 天野慶之, 山田金次郎, 尾藤方通, 高瀬明, 高瀬明, 田中昭二. 1955. 放射能汚染魚に関する研究－I. 魚体組織の放射能について. 日本水産学会誌, 20, 907-915.

[16] Lessard, E., Miltenberger, R. P., Conard, R. A., Musolino, S. V., Naidu, J. R., Moorthy, A., Schopfer, C. J. 1985. Thyroid absorbed dose for

people at Rongelap, Utirik, and Sifo on March 1, 1954. BNL 51882, Brookhaven National Laboratory.

[17] 厚生労働省科学研究費補助金「ビキニ水爆関係資料の線量評価に関する研究」平成 27 年度総括・分担研究報告書. 2016.

[18] Beck H. L., Bouville A., Moroz B. E., Simon S. L. 2010. Fallout deposition in the Marshall islands from Bikini and Enewetak nuclear weapon tests. *Health Phys.* 99. 124-142.

[19] 木羽敏泰, 大橋茂, 柴田村治, 水辺忠昭. 1954. いわゆる「原爆マグロ」に附着セル放射性物質について. *分析化学*, 3, 361-363.

[20] 山下正寿. 2012. 核の海の証言 ビキニ事件は終わらない. 新日本出版社.

別表 1

乗船船舶別の被災状況

船舶名	出港日・帰港日	操業位置	被災日	水産庁指定海域滞在期間	検査結果（単位：毎分当たりのカウント）		
					人	船体	魚
第 8 順光丸	S29.3.29-S29.5.19 (築地入港)	北緯 10~12 度 東経 169~172 度(4.14~5.4)	4.26 5.5		0~74 (身体) 100~346 (衣類・寝具等)	1,500~30,000 (操舵室、炊事室煙突、マストなど)	3,090~8,962 (サメヒレ)
第 13 光栄丸	S29.2.3-S29.3.26 (三崎入港)	北緯 9~10 度、東経 176 度 (3.1~3.13)	3.1	復路 (3.15~3.19)	500	13,200	6,050 (サメヒレ)
第 5 明賀丸	S29.3.15-S29.4.25 (東京入港)	北緯 9 度 4 分~9 度 20 分、 東経 178 度 00 分~178 度 30 分 (3.30~4.11)	3.27 4.7	往路(3.26) 復路(3.14-3.15)	100~200 (5 名の作業衣) ※頭髪なし	100~2,500 (操舵室内、三番魚艙、上部船橋羅針儀など)	62~246 (ビン長)、 147~191 (カツオ)
第 2 幸成丸	S29.2.24-S29.4.15 (築地入港)	北緯 8~11 度、東経 117~178 度 (3.11~4.1)	3.27 4.7	往路(3.5~3.9) 復路(4.4-4.6)	224~227	2,016~4,292	48
第 7 大丸	S29.3.1~操業開始 -S29.4.1 (東京入港)	北緯 9 度 30 分~10 度 東経 178~179 度 (3.1~3.22)	3.1	往路(2.26 ~2.28)、復路 (3.13~3.22)	37~435 (19 名)	—	90
第 5 海福丸	S29.2.21-S29.4.7 (東京入港)	北緯 9 度 5 分、東経 179 度 (3.12~3.25)	3.1 3.27	復路 (3.26~3.30)	85	182	500
第 11 高知丸	S29.2.18-S29.4.17 (東京入港)	北緯 9 度、東経 179 度 (3.6~4.4)	3.1 3.27	往路(2.25~3.4) 復路(4.4~4.8)	200~300	200~5,000	100-160
第 1 月山丸	S29.9.15-S29.11.21 (焼津入港)	南緯 16~17 度、東経 161~162 度 (10.5~10.24)	なし				250 (クロカジキ)

※全国健康保険協会船員保険部の提供資料を複製

別表 2

ピンナガの生組織及び灰化組織の相対放射能（標本 No.25）

組織	相対放射能	
	灰化組織	生組織
胆嚢	100	100
腎臓	50	30
肝臓	25	16
腸	18	8.5
幽門垂	14	14
心臓	13	6.0
胃	12	4.7
生殖腺	7.1	6.3
腸内容物	4.1	32
胃内容物	2.2	4.8
血合肉	2.1	1.5
エラ	1.0	0.5
筋肉	0.6	0.3
眼	0.2	0.4
鎖骨	0.08	0.1
皮膚	0.07	0.07
エラ蓋	0.04	0.7

※参考文献[15]から改編して転載

V. 米国のビキニ水爆実験により放射線被ばくしたという
漁船員の線量評価に関するコメント

米国のビキニ水爆実験により放射線被ばくをしたという 漁船員の線量評価に関するコメント

はじめに

過去の放射線被ばくを調べる方法にはふたつの方法がある。ひとつは歯エナメル質に記録された CO_2^- ラジカル量を電子スピン共鳴 (ESR) という方法で測定するものであり、他方は血液リンパ球を培養して分裂細胞に見られる染色体異常の頻度を測定するものである。

以下に各方法についてその性質を説明しておきたい。

歯エナメル ESR 法の特徴

- ・ 歯のエナメル質に記録されている CO_2^- ラジカルを測定する。
- ・ CO_2^- ラジカルの信号強度は、放射線量の増加と共に直線的に増加する。
- ・ ESR 信号強度は光子エネルギー依存性がある (0.2MeV 以下で信号強度が大きくなる)
- ・ 線量率に依存しないので低線量率被ばくでも測定量が減ることはない。合計量だけが測定される。
- ・ この性質故に考古学で骨や歯の年代測定にも使われる。
- ・ TLD (熱蛍光線量計) とは異なり同じ試料を何度でも測定できる。
- ・ 線量測定には大臼歯しか適していない。
- ・ 大臼歯以外の歯は、放射線被ばくとは関係のない信号が強く表れるので、使えない。
- ・ 象牙質にはラジカル信号は正しく記録されないので除去しないとイケない。

リンパ球における染色体異常測定の特徴

- ・ 血液 2ml を使用するが、その入手は ESR に使用する大臼歯と比較すれば遙かに容易。
- ・ 被ばく後早期の場合は、観察の容易な不安定型染色体異常 (2 動原体、ring) を観察する。
- ・ 不安定型染色体異常は細胞分裂に支障があるので数年の半減期で消失してゆく。
- ・ 被ばく後長い年数 (10 年以上) を経た場合には、観察の難しい安定型染色体異常を測定する。
- ・ 安定型染色体異常は細胞分裂に支障がないので生涯残存する。
- ・ 線量反応は、急性被ばくの場合は 2 次関数的、慢性被ばくの場合は直線に近づく。
- ・ 不安定型染色体異常 (2 動原体、環状) の自然頻度は 10^{-3} (1000 個の細胞に数個) レベル。
- ・ 安定型染色体異常 (転座、逆位) の自然頻度は 10^{-2} (100 個の細胞に数個) レベル。
- ・ どちらの異常も自然頻度は年齢と共に増加する。
- ・ 線量率依存性がある (長い時間をかけて被ばくした場合には、同じ線量でも異常が少ない)。

・即ち転座頻度の1%増加は、急性被ばくなら約100mGy、数10年に及ぶ慢性被ばくなら約1000mGyによって生じるという違いがある。

- ・60歳を超えると転座（安定型異常の代表）の自然頻度は2%以上に上昇する（個人差も大きい）。
- ・故に60歳以上の人の低線量被ばくの線量評価は、自然頻度の個人差が大きいため困難を伴う。

次になぜ ESR 測定の対象が大臼歯に限定されるかについて述べる。下の図は、遠距離の原爆被爆者（推定被ばく線量が5mGy未滿）より提供された色々な歯の ESR 測定結果であり、縦軸は歯の外側半分（頬側）、横軸は内側半分（舌側）の結果を示す。観察された ESR 信号強度は、検量線に照らしてガンマ線の等価な線量として表示してある。これから分かることは、大臼歯以外の歯では、コバルト60ガンマ線の被ばく線量に換算して0.5Gyを越えるような大きな ESR 信号を示す例が多いことである。しかし、これらの歯を提供した人の多くが大量の放射線に暴露した訳ではない。というのも、大臼歯の多くは±0.2Gy程度以内に収まっているからである。故に、大臼歯以外の歯に見られる大きな ESR 信号は、放射線被ばく以外（太陽紫外線との説もある）に原因がある。また大臼歯の結果は、ある程度大きな ESR 信号を示す例も散見されるが、試料によっては検量線作成に用いた線量0の試料よりも小さい ESR 信号を示す場合もあることを示している（後者は、推定線量はマイナス値になっている）。以上のことは、大臼歯以外の試料における ESR 信号強度は、放射線被ばくの証拠としては利用（信用）できないこと、並びに大臼歯であっても±0.2Gy程度は測定試料自身のバラツキ（variation）があることを示している。

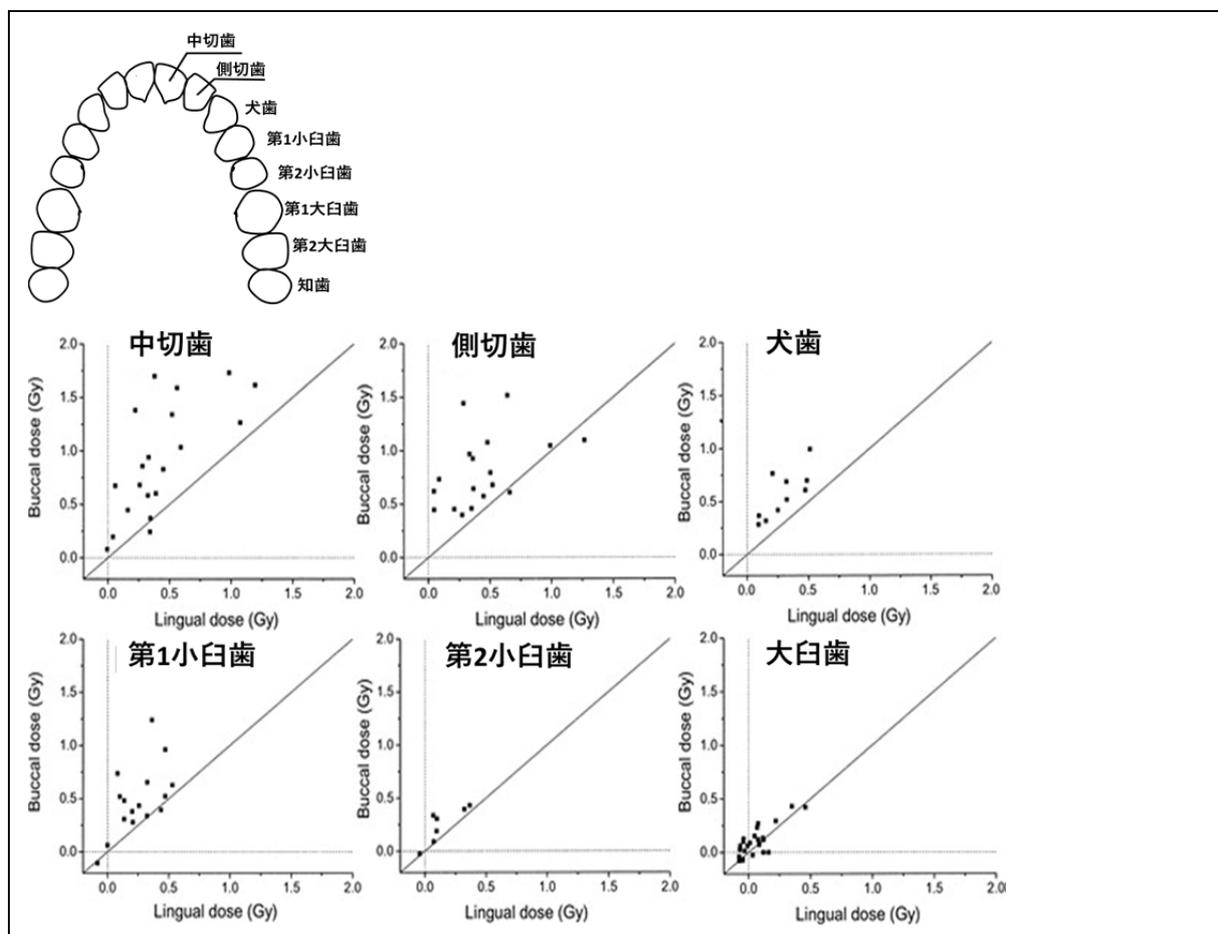


図1 原爆ガンマ線による推定被ばく線量が5mGy未満の被爆者から提供された歯のESR信号強度から求めたガンマ線等価線量。それぞれの歯は内側と外側に分離しエナメル質を分離しESR測定を行った。横軸は舌側線量、縦軸は頬側線量を示す(文献1)

第1部

星正治氏による「放射線の被曝とマグロ漁船員の歯による被曝線量評価」
 豊田新氏による「ビキニ水爆実験による日本人漁船員のESR被曝線量測定」
 に関するコメント

豊田氏らにより使用されたESR信号の測定方法

得られたESR信号を、有機ラジカル信号とCO₂⁻信号に分離する。そして後者の信号強度を、標準試料を用いて作成した検量線に照らして線量を推定する。

測定結果：次の表に示す通り(スライド原稿による)。

表1 ビキニ水爆実験のフォールアウトにより放射線被ばくした可能性のある漁船員の歯エナメル質のESR測定結果

船名	氏名	試料番号	ESR推定線量 (mGy)
第十宝成丸	I	1: 臼歯 (内)	109 ± 10
		1: 臼歯 (外)	92 ± 17
		2: 3 番犬歯 (内)	164 ± 11
		2: 3 番犬歯 (外)	252 ± 8
第五明賀丸	Y	臼歯 (内)	177 ± 27
		臼歯 (外)	414 ± 11

以下にコメントを記す。

総論

Hiraiらの論文(文献2)によると、原爆被曝とは全く関係のない20歳前後の若い人から提供された数本の知歯(第3大臼歯)からエナメル質を分離し、プールして標準試料とした。そしてそれを小分けにした後、いろいろな線量のガンマ線を照射してESR測定を行い検量線を作成した。そしてDS02による推定被ばく線量が5mGy未満の遠距離被爆者に由来する個々の大臼歯を測定したところ、ガンマ線照射していない標準試料よりも小さい信号しか示さなかったものが多数存在した(それらにはマイナスの推定線量が与えられている。マイナス100mGyに相当する場合もある)。そして同時に標準試料よりも大きい信号を示したものもほぼ同数存在している(図2参照)。このことは、歯のベースラインに相当するESR信号には、試料間のバリエーションがあることを意味している。(ただしHiraiらが用いた方法は、1996年に出版されたIgnatievらの方法で、マイクロウェーブの強度を高くすると、放射線誘発ラジカルの測定値は比例して大きく

なるが、有機信号はほぼ変化しないことを利用するものである。豊田らの方法とは異なる)。

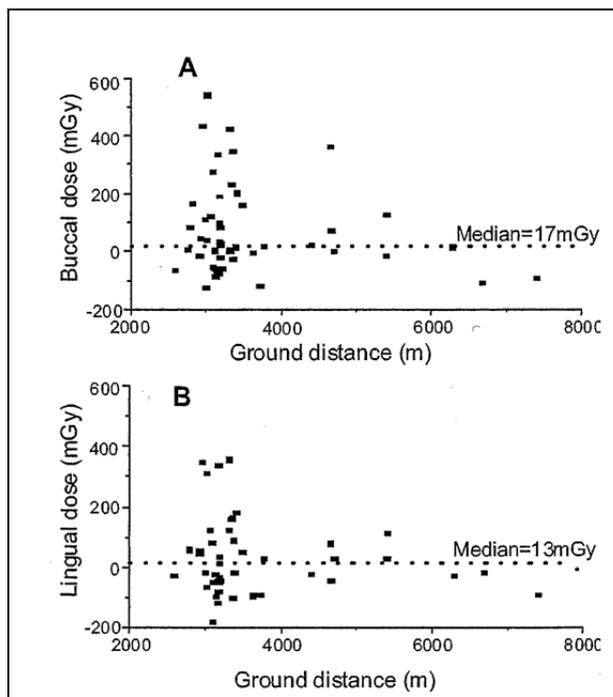


図2 DS02 による推定被ばく線量が 5mGy 未満の原爆被爆者から提供された大白歯を用いた線量評価。上段は頬側の半分、下段は舌側の半分における推定線量。横軸は爆心地からの距離である。検量線作成に用いた線量 0 のエナメル試料における ESR 信号よりも小さい信号しか示さない試料に対しては負の推定線量を与えている。(文献 2)

ここで、星氏および豊田氏の報告を考える。用いられた方法は、あらかじめ得られているバックグランドの信号(有機物ラジカルによると考えられている)に、高線量照射により得られている ESR 信号(CO_2^-)を色々なレベルに加工したものを加えて、測定試料の信号に最もよくフィットする条件を求めようである。具体的には、恐らく先に述べた方法と同様に、数個の放射線暴露の可能性の低い歯からエナメル質を得てプールし、それをいくつかに分けてバックグランドの信号(有機ラジカル信号)と大線量を照射した後の放射線信号を得たのであろう(バックグランドとなる有機信号は歯により多少異なるので平均をとる意味もある)。もしそうであれば、各試料に共通して使用された有機ラジカル信号は、数個の歯の平均的な信号ということになる。これは重要なことで、歯の試料間にはバリエーション(ばらつき)があるので、個々の歯についてみるならば、この平均有機信号よりも大きい信号や小さい信号を示す例があることを意味している。

各論

第十宝成丸の I 氏の場合： 「白歯」という表現が不適切である。図 1 に示したように、大白歯

であれば問題ないが、小臼歯であれば測定結果を放射線被ばくによるとは結論できないからである。

試料 1 (臼歯) では、内側で 109mGy、外側で 92mGy とほぼ同じ値である。これらの値は小臼歯であっても大臼歯であっても、普通に見られるレベルであり、実際スライドにあるように自然放射線レベルを 45mGy、医療被ばくを 50mGy と見積もるなら、過剰線量はほとんどない。

試料 2 (3 番犬歯) は、外側で 250mGy、内側で 160mGy、その差は約 100mGy である。先に結論を述べるならば、犬歯についての議論はそもそも意味がない。その理由は、最初に述べたように大臼歯以外の歯では頬側の値が舌側よりも相当高い値を示すことが多々あり、それは放射線以外の原因 (例えば紫外線) による過大評価 (インフレ値) と考えられているからである (図 1)。つまり歯エナメル質 ESR を用いた線量評価は大臼歯で行うことが勧告されている理由はここにある。

以上の結果は、I 氏の歯試料における ESR 測定の結果は、過度の放射線被ばくを支持するものとはならない。

第五明賀丸の Y 氏の場合：

この場合も、大臼歯を測定したのかそれとも小臼歯なのか明確でない。歯の内側と外側の推定線量の差が大きい ($414 - 177 = 237\text{mGy}$) ことを考えるなら、第 1 小臼歯か第 2 小臼歯の可能性が高い。実際に、頬側 (414mGy) と舌側 (177mGy) の値を図 1 に記入してみれば違和感のないことが分かる。はじめに述べた通り、小臼歯から得られた ESR 情報は被ばく線量評価には利用できない。

他方、もしこの試料が大臼歯であった場合には、頬側と舌側に共通している 177mGy が深部に届いた線量の可能性がある。この値から自然放射線の 45mGy と医療放射線の 50mGy を引いた 82mGy がビキニでの過剰被ばくの可能性となる。しかしもしも測定結果が放射線被ばくによると考えるのであれば、頬側と舌側の ESR 推定線量の差が 200mGy にも達することが説明できなくてはならない。

水爆実験のフォールアウトに起因するという考えでは、ガンマ線の平均エネルギーは 0.7MeV (「平成 26 年度および 27 年度のビキニ水爆関係に関する研究」) なので、とても舌側で半分に減るとは考えられない (エナメル質の比重は 3 弱なので、大臼歯の直径を 1cm として、半分の 0.5cm の厚さで 0.7MeV 光子の線量が半分に減るとは考えられないからである)。

他方、低エネルギーの医療用放射線 (X 線) を考えると、線量が半分に減るような光子エネルギーを想定することは可能であるが、そのような光子 (例えば 200keV 以下) の場合は、線量当たりの ESR 信号強度は ^{60}Co ガンマ線よりも数倍大きい (文献 3)。従って、このような場合の線量推定は、 ^{60}Co ガンマ線の検量線から求めた線量よりも数倍小さいことになる。高エネルギー β 線による被ばくの場合は、例えば ^{90}Sr の原子崩壊に伴う ^{90}Y から生じた β 線 (最大エネルギーは 2MeV) であっても、水中の飛程は 1cm 程度でしかないので、発がんの標的となるような臓器が受ける線量はほとんど発生しない。従ってがんリスクの増加には結びつかない。

結論

検討に値する可能性があるのは、I 氏の場合はサンプル No.1（臼歯）に見られた値であるが、大臼歯であれ小臼歯であれ 100mGy では過剰被ばくには当たらない。Y 氏の場合も、測定結果は試料が小臼歯であったとの印象が強く、その場合は検討に値しない。

もしも Y 氏の試料が大臼歯であった場合は、頬側が舌側よりも 200mGy も高い推定線量であることに違和感が強い。この場合、舌側についての推定線量である 177mGy から自然放射線と医療被ばくを引いた 82mGy が体の深部における過剰被ばくの可能性ということになる。しかしたとえ大臼歯であったとしても、頬側と舌側の差を説明しようとするれば、フォールアウトのガンマ線（平均 0.7MeV）では整合性が取れない。

以上、今回の漁船員の歯を用いた線量評価の情報に接する限り、ビキニ核実験の被災により相当多量の放射線被ばくを受けたとは結論できなかった。「臼歯」という、大臼歯か小臼歯か分からない曖昧な記述は、訴えの内容に比べて真摯さが問われる。

文献

- 1) Nakamura N, Cullings HM, Kodama Y, Wada T, Miyazawa C, Lee K, Awa AA. A method to differentiate between the levels of ESR signals induced by sunlight and by ionizing radiation in teeth from atomic bomb survivors. *Radiat Res.* 2006;165:359-64.
- 2) Hirai Y, Kodama Y, Cullings HM, Miyazawa C, Nakamura N. Electron spin resonance analysis of tooth enamel does not indicate exposures to large radiation doses in a large proportion of distally-exposed A-bomb survivors. *J Radiat Res.* 2011;52(5):600-8.
- 3) Ulanovsky A, Wieser A, Zankl M, Jacob P. Photon dose conversion coefficients for human teeth in standard irradiation geometries. *Health Phys.* 2005 Dec;89(6):645-59.

第2部

田中公夫氏による「ビキニ被災船員の血液分析—染色体異常」へのコメント

目的

文献1の英文論文で示された情報について吟味する (Tanaka K ほか Radiat Environ Biophys. 2016 ;55:329-37)

報告された結果

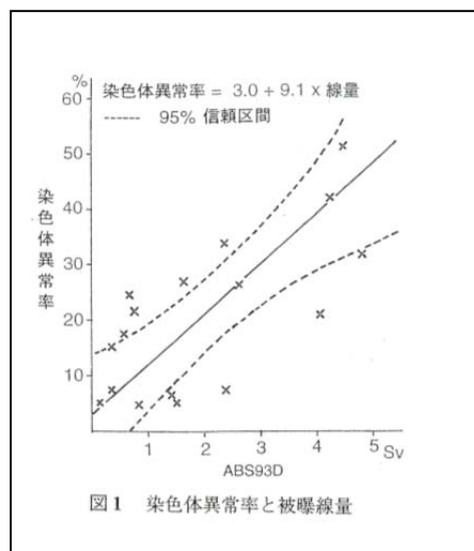
安定型染色体異常をもつ細胞の頻度は、被ばく群で3.35%、対照群で2.45%であった。その差は0.90%で統計学的に有意であった。

	調査人数	観察細胞数	安定型染色体異常の数	安定型染色体異常をもつ細胞数
被ばく群	19人	5,909	237 (4.0%)	198 (3.35%)
対照群	9人	2,768	72 (2.6%)	68 (2.45%)
両者の差			1.4%	0.9%

報告結果の解釈

過去の放射線被ばくによる線量を推定する方法として、 $Y = 0.0094D + 0.78$ という式が記載されている (文献1、331 ページ)。その由来は鎌田ほか (1993 年) とあり、原爆後障害研究会で発表されたものである (文献 2)。参考のため、その図をここにコピーした。

これは被爆者 17 人を調査した結果得られたものであったが、文献 1 では「11 人の健康な広島被爆者」からの回帰直線を使用したとあるので、健康ではなかった 6 名を除外したと理解される。11 人のデータの勾配は 9.4% per Gy なので安定型染色体異常をもった細胞頻度の 0.9% の増加は 96 mGy の放射線被ばくに相当すると結論されている。



問題点

検量線に原爆被爆者のデータを使用するという事は、急性被ばくのデータを使用するという事である。周知の様に水爆実験のフォールアウトによる被ばくは、急性被ばくというよりは中程度の慢性被ばくであっただろう。そう考えると、数日かけて一定量の放射線を照射したという実験条件の方がふさわしい。

リンパ球を数日間にわたって培養しながら照射した実験は極めて限られているが、文献 1 と同じ著者 (Tanaka) らが行った中程度の慢性被ばく実験の報告がある (文献 3)。セシウム 137 からのガンマ線を毎分 0.02cGy で照射、照射時間は 80 時間までとある。そうして得られた、2 動

原体 (dic) + 環状染色体 (ring) の頻度は次の 2 次式で表される。

$$Y = -3.245 \times 10^{-3} + 1.837 \times 10^{-2}D + 1.846 \times 10^{-2}D^2$$

ここに右辺として、転座 (dic と同じ頻度で生じる) と逆位 (ring と同じ頻度で生じる) の合計頻度を考える。安定型異常染色体の中で転座と逆位の割合は、各々 67% と 11% と記述されているので、合計では 78% となる。従って、両群間の安定型染色体異常の頻度差 1.4% の 78%、つまり 1.09% が転座 + 逆位ということになる。そこで、右辺 = 0.0109 (1.09%) と置いて 2 次式を解くと、 $D = 0.509\text{Gy}$ (509mGy) が得られる。500mGy という値はもし本当に被ばくしていたのであれば、歯エナメル質における ESR 法によって容易に検出が可能なレベルである (歯エナメル質 ESR には線量率に依存しないという利点がある)。

考察

慢性被ばくの場合には、細胞は DNA に生じた傷を徐々に治しながら被ばくが続くという状況になるので、染色体間の交換頻度は、急性被ばくの場合 (一度に傷ができる) よりも低くなる。従って、ビキニ核実験の被災のような場合には、原爆のような急性被ばくではなくて、中程度の慢性被ばくの条件で推定作業を行うのが望ましいだろう。実際、鎌田らは、広島の高須地区でフォールアウトに被ばくしたと思われる被爆者の例に関して、上記の文献 3 (毎分 0.02cGy の低線量率で照射) の結果を用いた被ばく線量の計算を行っている (文献 4)。

上記の Tanaka らの実験結果は他の研究者による結果と一致しているかどうか吟味した。英国の Lloyd らによる同様の報告では、毎分 0.3cGy (18cGy/hr) の結果が示されており、Dic の生成効率、 $Y = 0.0176D + 0.0291D^2$ で記述されるという (文献 5)。上に述べた Tanaka らの報告 (文献 3) と比較して、線量 D の 1 次の係数はほぼ同じ (0.01837 対 0.0176) であるが、2 次の係数は Tanaka らの値が少し小さい (0.01846 対 0.0291)。これは照射線量率が、Tanaka らの方が一桁低い (毎分 0.02cGy 対 0.3cGy) ことを考えれば納得できる。他方、Hsieh らは 48 時間かけて 0.9Gy, 0.6Gy, 0.3Gy を照射した (文献 6)。最大線量率は毎分 0.03cGy であり、これは Tanaka らの照射条件にほぼ匹敵する。FISH による転座の誘発率は $Y = 0.024D$ で記述されているので、1.4% の安定型異常頻度の 67%、つまり 0.94% が転座頻度の上昇と考えるなら、それに必要な線量は、0.392Gy (約 400mGy) ということになり、上記の推定線量の約 500mGy に近い結果が得られる。

結論

Tanaka らは文献 1 の論文で、原爆被爆者の染色体異常頻度と推定被ばく線量との関係を用いて、被災漁船員の平均被ばく線量は約 100mGy と結論づけている。しかしフォールアウトによる放射線被ばくは原爆放射線の被ばくよりも遥かに長い時間 (少なくとも数日) に及ぶと考えられるので、Tanaka らが以前に報告した数日にわたる低線量率照射の実験結果を検量線として用いる方が望ましい。この場合、線量率が下がると検量線の勾配が小さくなるので、同じ 0.9% の頻度増加であっても、それを生じた線量は大きくなる。即ち、推定被ばく線量は約 100mGy ではなくて約 400~500mGy になる。問題はこうして得られた 500mGy に近い線量の放射線被ばくが本

当にあったのか、それとも9人の対照群の平均値と比べてたまたま平均値に差が出たのかである。歯のエナメル質に蓄積された放射線被ばくの信号は、線量率には依存せず合計線量を信号として記録しているものであるが、ESR測定の結果は約500mGyというレベルの放射線被ばくを支持していない。

60歳を越えるとバックグラウンドの転座頻度は平均が2%を超えるようになる(2%よりも高い人も出るということである)。従って、ふつう個々人における被ばく前の転座頻度など調べたりすることはないから、0.9%の頻度増加があっても、個人の被ばくの証拠とするのは無理である。この問題を克服するために、今回の論文では対照群9名、被ばく群19名の平均値の差を被ばくの根拠としている。しかしその差は、歯ESRのデータによって支持されるものではなかった。その食い違いの理由は不明であるが、対照群の9名は「被ばく群と年齢を合わせた漁師や工場勤務者」とあるところに一抔の不安を覚えた。遠洋漁業者でビキニに行っていない人を対照者として調べて欲しかったからである。第1部のESR測定で用いられた歯の種類に関する記述(「臼歯」)も同根であるが、科学における客観性の担保には厳密性が必要とされることを喚起したい。

文献

1. Tanaka K, Ohtaki M, Hoshi M, Chromosome aberrations in Japanese fishermen exposed to fallout radiation 420-1200 km distant from nuclear explosion test site at Bikini atoll: Report 60 years after the incident. *Radiat Environ Biophys.* 2016 ;55(3):329-37
2. 鎌田七男、田中公夫、麻生博也ほか「近距離被爆生存者に関する総合医学的研究 第21報 染色体異常率から得られたABS93D推定線量」第34回原爆後障害研究会報告集(1993年)98-100ページ。
3. Tanaka K, Sawada S, Kamada K. Relative biological effectiveness and dose rate effect of tritiated water on chromosomes in human lymphocytes and bone marrow cells. *Mutat Res* 323 (1994) 53-61.
4. 鎌田七男、斉藤紀、清水潤司、池田正直、武島幸男、木村昭郎、田中公夫。フォールアウトによると思われる3重癌と3つの放射線関連疾患を持つ1症例。長崎医学会雑誌(2008年)83, 335-340
5. Lloyd DC, Purrott RJ, Dolphin GW, Bolton DAWN, Edwards AA. The relationship between chromosome aberrations and low LET radiation dose to human lymphocytes. *Int J Radiat Biol* 1975, 28, 75-90.
6. Hsieh WA, Deng W, Chang WP, Galvan N, Owens CL, et al. Alpha coefficient of dose response for chromosome translocations measured by FISH in human lymphocytes exposed to chronic ^{60}Co gamma rays at body temperature. *Int J Radiat Biol.* 1999, 75, 435-439.