

福島第一原子力発電所事故による海藻類の放射性セシウム蓄積
-いわき市とその周辺における2年間の推移-

川井浩史¹・北村晃²・三村真理³・三村徹郎³・田原睦也⁴・會田大来⁵・佐藤健二⁵・
佐々木秀明⁵

1. 神戸大学・自然科学系先端融合研究環 内海域環境教育研究センター
〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1
2. 神戸大学・海事科学研究科
〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1
3. 神戸大学・理学研究科
〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1
4. いわき明星大学・いわき地域復興センター
〒970-8044 福島県いわき市中央台飯野5-5-1
5. いわき明星大学・科学技術学部
〒970-8044 福島県いわき市中央台飯野5-5-1

**Radioactive cesium accumulation in seaweeds by the Fukushima 1 Nuclear Power
Plant accident – Two years' monitoring at Iwaki and its vicinity –**

Hiroshi Kawai¹, Akira Kitamura², Mari Mimura³, Tetsuro Mimura³, Tomoya Tahara⁴,
Daiki Aida⁵, Kenji Sato⁵, Hideaki Sasaki⁵

1. Kobe University Research Center for Inland Seas,
Rokkodai, Nada-ku, Kobe 657-8501, Japan
2. Graduate School of Maritime Science, Kobe University
Fukae, Higashinada, Kobe 658-0022, Japan
3. Graduate School of Science, Kobe University
Rokkodai, Nada-ku, Kobe 657-8501, Japan
4. Iwaki Community Reconstruction Center, Iwaki Meisei University
Iwaki, Fukushima 970-8551, Japan
5. Faculty of Science and Technology, Iwaki Meisei University,
Iwaki, Fukushima 970-8551, Japan

Keywords: ^{134}Cs • ^{137}Cs • F1NPP • ^{40}K • radionuclide accumulation • seaweeds

要 旨

2011年3月に発生した福島第一原子力発電所（福島第一原発）事故による沿岸海水の放射能汚染によって引き起こされた海藻類への放射性物質の蓄積状況とその推移を、高純度ゲルマニウム検出器を用いて2年間にわたり調査した。測定に用いた海藻試料は福島第一原発から約50 km圏にある福島県いわき市永崎海岸においておおむね季節毎にスノーケリングなどにより採集したほか、福島県相馬町、広野町、久ノ浜、塩屋崎においても適宜採集し、また千葉県および兵庫県において採集した試料を対照として用いた。その結果、2011年5月には、塩屋崎と永崎で採集した海藻類試料のほとんどは $3,000 \text{ Bq kg}^{-1}$ を超える ^{137}Cs の放射能強度を示し、最も高い値は褐藻ワカメの $7371.20 \pm 173.95 \text{ Bq kg}^{-1}$ であった。同時期の2011年5月2日に塩屋崎および永崎で採水した海水はそれぞれ 8.41 ± 3.21 および $9.74 \pm 3.43 \text{ Bq kg}^{-1}$ の値を示した。この結果から推定される海藻類のCs濃縮率は生の状態と乾燥後の海藻類の重量比（湿重量/乾重量）を10と仮定すると、分類群によって異なり、8-50の範囲にあった。その後、5-6ヶ月の間に ^{137}Cs の放射能強度は急激に減少したが、続く12-16ヶ月はあまり変化せず、10-110 Bq kg^{-1} であった。海藻類の ^{137}Cs 蓄積は、周辺海水の汚染が最も高濃度であった2011年3-4月から2年経過した2013年3月でも今回の測定機器・方法で検出可能なレベルにあった。

1. はじめに

福島第一原子力発電所事故によって引き起こされた沿岸海水の放射能汚染は、それが短期間に起こったことや、その規模の大きさにおいてこれまで例を見ないものであった (Linsley et al. 2005, Buesseler et al. 2011)。この事故によって事故直後に放出された放射性物質の量は大気中に5-10 PBq（ペタベクレル）であり、また汚染された冷却水の流出によって海洋に放出された量は3-6 PBqであったとされている (Kawamura et al. 2011, Estournel et al. 2012, Miyazawa et al. 2012, Tsumune et al. 2012)。

海洋における放射性物質による汚染は、大きく分けて、1) 大気中にプルームとして放出されたものが落下したもの、2) 高濃度の汚染水が直接海洋に排水されたもの、3) 汚染された土壌から雨水により川を通して流入したものによって引き起こされた。

これらのうち、1) は2011年3月中旬に最も顕著であり、2) は2011年3月下旬から同4月上旬にかけて顕著であった。これらの放射能汚染された海水は基本的に希釈されるか、海流によって沖合へ運ばれた。しかし、沿岸域においては放出された放射性セシウムやそのほかの放射性物質の相当量が、沿岸に生育・生息する生物に取り込まれるか懸濁する粒子に結合し、次いでこれらが沈下することによって海底に堆積したと

考えられる。海水中の放射性物質の濃度は、2011年4月中旬に最も高く、その後、急激に減少した。しかし、河川からの流入に加えて、少なくとも2012年の時点でも福島第一原発からの直接的な流出が継続していたことが報告されている (Kanda 2013)。

原発事故により放出された放射性物質のうち、その量の多さと自然崩壊に要する期間の長さから ^{134}Cs と ^{137}Cs が、汚染水による生物汚染を引き起こす要因として特に重要であると考えられる。海藻類は成長時に藻体の表面から直接海水中に溶けている栄養塩類やさまざまな無機物を吸収する。セシウムイオン(Cs^+)は海水によく溶け、海藻類を含む藻類の細胞は Cs^+ をカリウム(K^+)トランスポーターを通して吸収し、細胞内に蓄積すると考えられている (Zhu & Smolders 2000, Kanter et al. 2010)。

海藻類の ^{137}Cs の濃縮率 (CF: concentration factor) は種によって大きく異なることが報告されており (Pentreath 1976, Coughtrey & Thorne 1983, Tateda & Koyanagi 1994), IAEAは標準的な値として50を用いることを推奨している (IAEA 2004)。一方、海藻類はアルギン酸、フカン、アガー (寒天)、カラギナンなどの細胞壁を構成している多糖類 (いわゆるファイココロイド) によってこれらのイオンを吸着すると考えられるが、 Cs^+ に対する親和性については十分な知見が得られていない (Morris et al. 1980)。海藻類は沿岸域生態系における主要な一次生産者のひとつであり、さまざまな底生動物や魚が海藻類を餌として利用している。このため海藻類に含まれる放射性汚染物質は消費者である動物によって摂食された後、食物連鎖により生物濃縮される可能性がある。

福島第一原発事故以前には、太平洋沿岸における海水の放射性物質汚染は、主に核兵器の試験によって大気中に放出された放射性物質の落下が原因であった。これによる海水の ^{137}Cs 汚染の放射能強度としては1-4 Bq m⁻³ が報告されている (Ikeuchi 2003, Povinec et al. 2004, Nakanishi et al. 2010)。Tateda & Koyanagi (1994) は、緑藻アオサ、紅藻アカバ、褐藻ホソメコンブ、アカモク、ウミトラノオなどに含まれる ^{137}Cs の放射能強度を測定し、海藻類における ^{137}Cs の平常値として生の標本あたり0.03-0.37 Bq kg⁻¹ (湿重量) を報告している。また、Morita et al. (2010) は1998-2008年に日本各地 (長崎県, 神奈川県, 新潟県) で採集されたワカメと北海道で採集されたナガコンブにおける測定で、 ^{137}Cs についてはワカメで約0.03-0.08 Bq kg⁻¹, ナガコンブで約0.05-0.09 Bq, その他のコンブ類やホンダワラ類で、0.02-0.34 Bq kg⁻¹ (いずれも湿重量) という測定結果を示している。

福島第一原発の事故の後、いくつかの研究機関などが主要な漁業対象生物に含まれる放射性物質の放射能強度の測定を行ってきた。その中にはいくつかの海藻類の種、たとえばアマノリ類、コンブ類、アラメ類、フノリ類、ヒトエグサ類なども含まれているが、その種数はかなり限定されており、また系統上 (分類上) の多様性、潮間帯であるか潮下帯であるかという生育場所、一年生であるか多年生であるかという生活史などの特徴などにおいてかなり偏っている。さらに、測定機関によって測定の方法はさまざまであり、検出限界値も測定機関によってはかなり高く、生の試料あたり20 Bq kg⁻¹ を超える場合もある。このため、これらの測定結果に基づいて海藻類における一般

的な放射性物質汚染の動態を把握することは困難であり、また分類群間の濃縮率の違いを比較することも困難であった。

これらのことをふまえて、本研究では高純度ゲルマニウム検出器を用いて、陸上植物試料や土壌試料とも共通の標準化された測定方法により、海藻類試料に含まれる ^{134}Cs 、 ^{137}Cs および ^{40}K 放射能強度の変化を、可能な限り季節的に解析することを目的として研究を行った。

2. 材料と方法

測定に用いた海藻試料は福島第一原発から約50 km圏にある福島県いわき市永崎海岸において概ね季節毎にスノーケリングにより採集したほか、福島県相馬町、広野町、久ノ浜、塩屋崎、宮城県岩沼においても適宜採集し、また千葉県鴨川、勝浦および兵庫県淡路島岩屋において採集したものを対照として用いた（図1, 16a-f, 17, 18）。測定に用いた試料の一覧を、神戸大学において測定したものについては表1に、いわき明星大学において測定したものについては表2に示す。

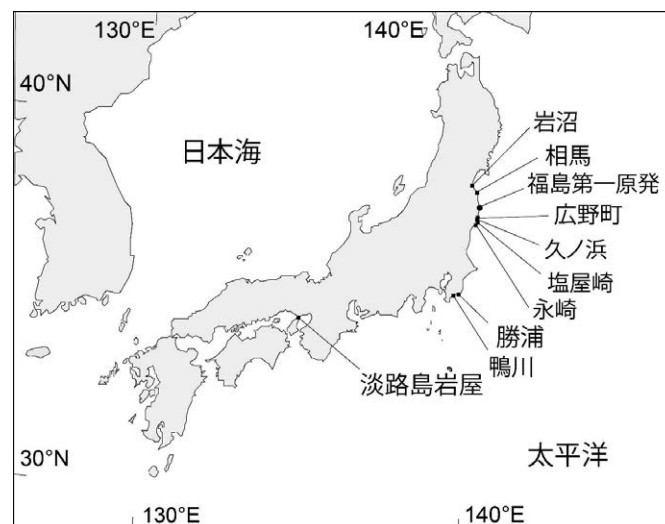


図1 本研究で測定に用いる海藻試料を採集した地点

神戸大学における測定では、採集された試料を種類毎に分けた後、その形態学的特徴により種同定を行い、室内において送風し、予備的に乾燥させた（図16g）。次いで、乾熱オーブンで90-100 °Cで8時間乾燥させた。乾燥前と乾燥後の海藻類試料の重量の比は約10であり、生の海藻試料について行われた測定結果との比較や、濃縮率（濃縮係数）の議論の際にはこの値を用いた。試料は乾燥後、手によって予備的に断片化した後、Waring J-SPEC 7011BUJブレンダー(Conair Corp., Stamford, CT, USA)によって粉碎した。粉碎した試料はU-8試料カップ（直径56 mm, 高さ68 mm）に充填し、測定に用いた。資料に含まれる放射性物質の放射能強度測定方法については Mimura et al. (2014) に記述する。表1, 2において、「誤差」は測定に用いた機器プログラムソフトウェアのシステムエラーに起因するものと、計測における標準偏差の両方を合わせたものに相

当する。また、2011年5月に永崎および塩屋崎において採水された海水もU-8試料カップに充たして、濃縮すること無く測定に用いた。

いわき明星大学における測定では、採集された試料を種類毎に分けた後、その形態学的特徴により種同定を行い、淡水で洗った後、室温で予備乾燥させた。次いで、乾熱オーブンで60 °Cで48時間乾燥させた後、ブレンダーで粉碎し、U-8試料カップに充填した（図16h）。放射能強度測定はGEM40P4-76 ゲルマニウム検出器 (Seiko EG & G, Tokyo, Japan)により、製品指定の取り扱い方法で¹³⁴Cs および ¹³⁷Cs の放射能強度を測定した。

事故後、最初に採集された海藻試料は、測定まで-20 °Cで保存されていた。この凍結過程が、凍結した試料が融解した際に、藻体に含まれていた放射性物質が高濃度（あるいは低濃度）の融解水（ドリップ）として失われることで、測定値に影響することが推定された。このため、凍結試料の融解過程において融解水で失われる放射性物質の量を測定し、その影響を明らかにするために、2011年7月には採取された試料の一部を凍結・融解した後、乾燥するものと直接乾燥するものに分けて測定を行った。また、この際生じた融解水に含まれる放射能の強度も測定した。

残念ながら本研究においてはさまざまな制約、例えば測定に十分な量の1つの種の試料を野外から採集することの困難さ、海藻類の測定に利用可能なゲルマニウム検出器の使用割当時間の不足などから、1カ所から採集されたそれぞれの海藻類の種について複数の試料を調整したり、反復測定を行ったりすることは困難であった。さらに、採集されたそれぞれの海藻試料の量が、測定に用いるU-8試料カップを充たすには十分でなく、測定によって得られた測定シグナルがかなり低い場合もあった。これらの理由から、本測定結果の信頼度について、統計的な検定を行うことは困難であった。

3. 結果

図2に、各測定試料において得られた¹³⁴Cs および ¹³⁷Cs の放射能強度の比を時系列的に示す。¹³⁴Cs /¹³⁷Cs 比の値は2年後には約0.6に減少しており、両者の自然崩壊時間の違いから予想される比の値（1年後に0.79, 2年後に0.64）と概ね一致した。

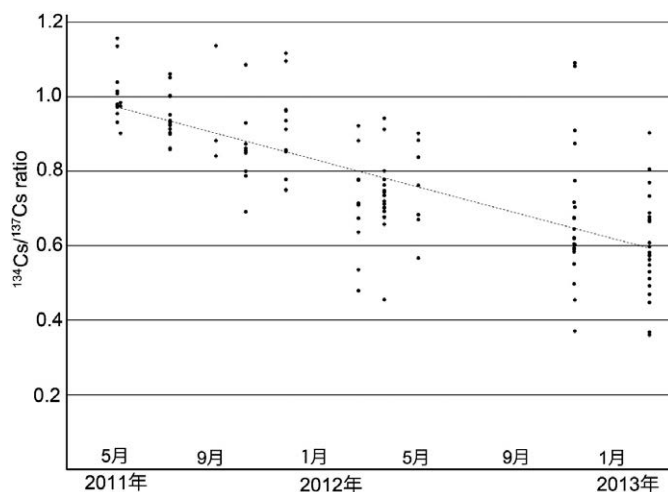


図2 測定試料における¹³⁴Cs/¹³⁷Cs比の変遷。破線は¹³⁴Csおよび¹³⁷Csの自然崩壊により予想される理論値。

神戸大学における ^{134}Cs , ^{137}Cs および ^{40}K の、いわき明星大学における ^{134}Cs および ^{137}Cs の測定結果をそれぞれ表1, 表2 に示す。福島第一原発から約50 km圏にあたる塩屋崎において2011年5月2日に、同じく永崎において2011年5月6日に採集された海藻試料はそのほとんど（緑藻アナアオサ、ウスバアオノリ、褐藻カヤモノリ、アラメ、ワカメ、タマハハキモク、ウミトラノオ）において ^{137}Cs の放射能強度は $3,000\text{Bq kg}^{-1}$ を超えていた（図3, 4）。今回の測定における最も高い ^{137}Cs 放射能強度を示した海藻試料は5月2日に塩屋崎で採集されたワカメの $7,371.20 \pm 173.95 \text{ Bq kg}^{-1}$ であった（図4および表1における資料番号k010）。また2011年5月2日に塩屋崎（図3）および永崎（図4）で採水された海水はそれぞれ $8.41 \pm 3.21 \text{ Bq L}^{-1}$ および $9.74 \pm 3.43 \text{ Bq L}^{-1}$ であった。

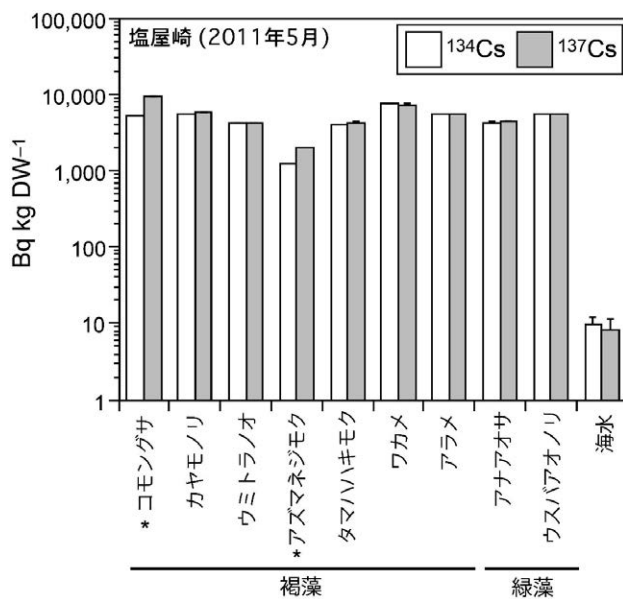


図3 2011年5月に福島県いわき市塩屋崎において採集された海藻類および海水の ^{134}Cs および ^{137}Cs の放射能強度。海水の測定単位は $\text{Bq kg}^{-1} \text{ w.w.}$ （湿重量）。星印はいわき明星大学における測定を示し、それ以外は神戸大学において測定。

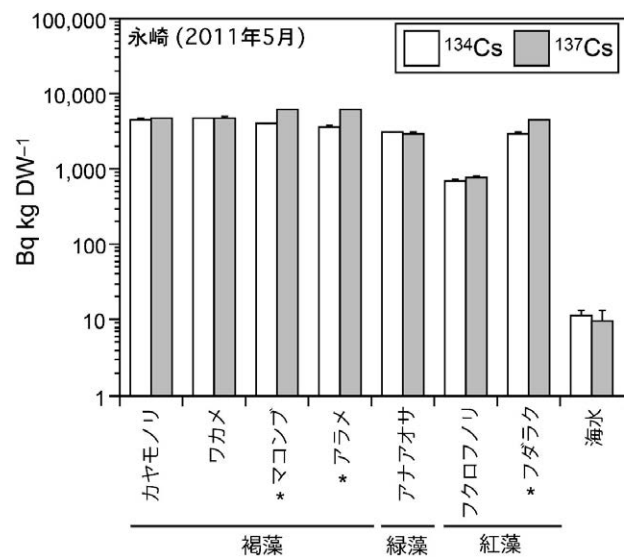


図4 2011年5月に福島県いわき市永崎において採集された海藻類および海水の ^{134}Cs および ^{137}Cs の放射能強度。海水の測定単位は $\text{Bq kg}^{-1} \text{ w.w.}$ （湿重量）。星印はいわき明星大学における測定を示し、それ以外は神戸大学において測定。

一方、対照として用いた淡路島で2011年5月に淡路島で採集された褐藻ワカメ、タマハハキモク、緑藻アナアオサの ^{137}Cs 放射能強度は検出限界値（0.001-0.002）以下であった。

永崎では海藻類の ^{137}Cs 放射能強度は、その後5-6ヶ月の間に著しく減少した。2011年7月に ^{137}Cs 放射能強度は約 $300\text{-}600 \text{ Bq kg}^{-1}$ （図5）であったが、同年10月には $40\text{-}200 \text{ Bq kg}^{-1}$ まで減少し（図6），2012年7月および同年12月には 100 Bq kg^{-1} 以下であった（図7, 8）。

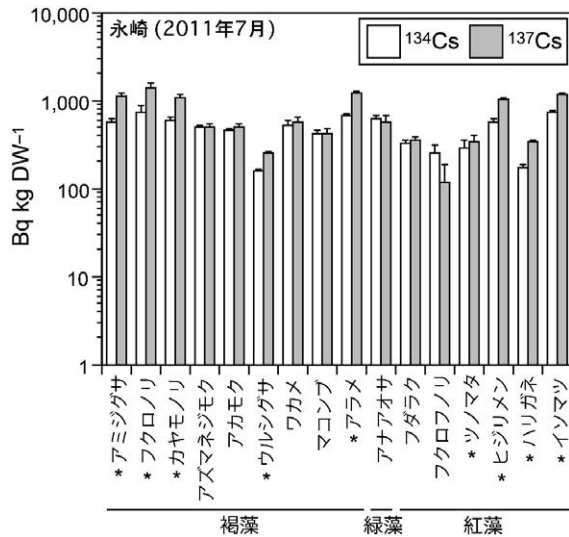


図5 2011年7月に福島県いわき市永崎において採集された海藻類の¹³⁴Csおよび¹³⁷Csの放射能強度。星印はいわき明星大学における測定を示し、それ以外は神戸大学において測定。

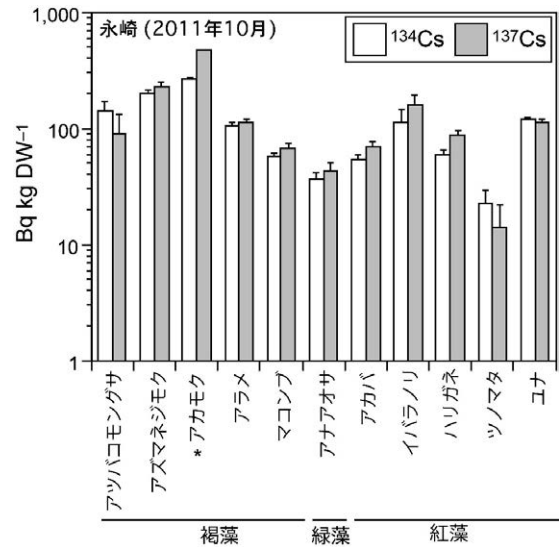


図6 2011年10月に福島県いわき市永崎において採集された海藻類の¹³⁴Csおよび¹³⁷Csの放射能強度。星印はいわき明星大学における測定を示し、それ以外は神戸大学において測定。

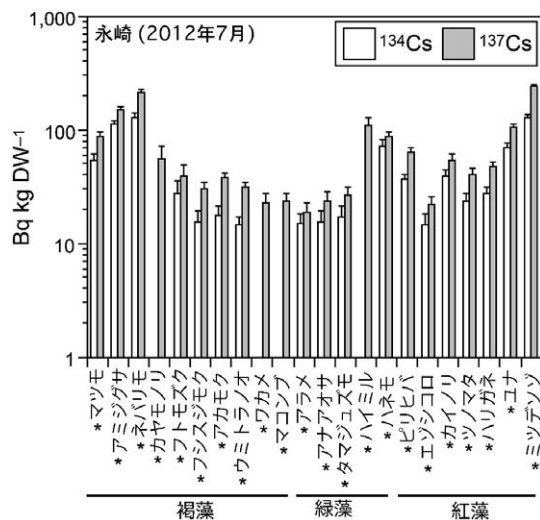


図7 2012年7月に福島県いわき市永崎において採集された海藻類の¹³⁴Csおよび¹³⁷Csの放射能強度。星印はいわき明星大学における測定を示し、それ以外は神戸大学において測定。

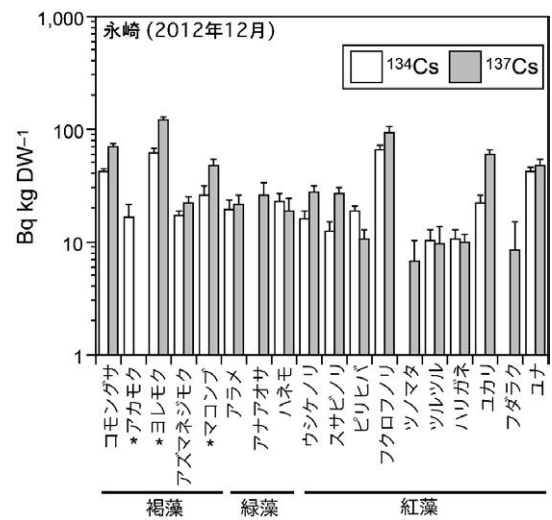


図8 2012年12月に福島県いわき市永崎において採集された海藻類の¹³⁴Csおよび¹³⁷Csの放射能強度。星印はいわき明星大学における測定を示し、それ以外は神戸大学において測定。

しかし、その一方で、最も高濃度の汚染にさらされた2011年3-4月から2年が経過した2013年3月においても¹³⁷Cs放射能強度は多くの海藻試料で検出可能な範囲にとどまり、約10-100 Bq kg⁻¹であった(図9)。

海藻試料中の¹³⁷Cs放射能強度の変化は分類群毎に異なる経過を示した。世代時間が非常に短い緑藻アナアオサでは、¹³⁷Cs放射能強度は2011年の夏季に顕著に減少したが、その後2011年冬季から2013年春季にかけても10-110 Bq kg⁻¹の範囲にとどまった(図10)。

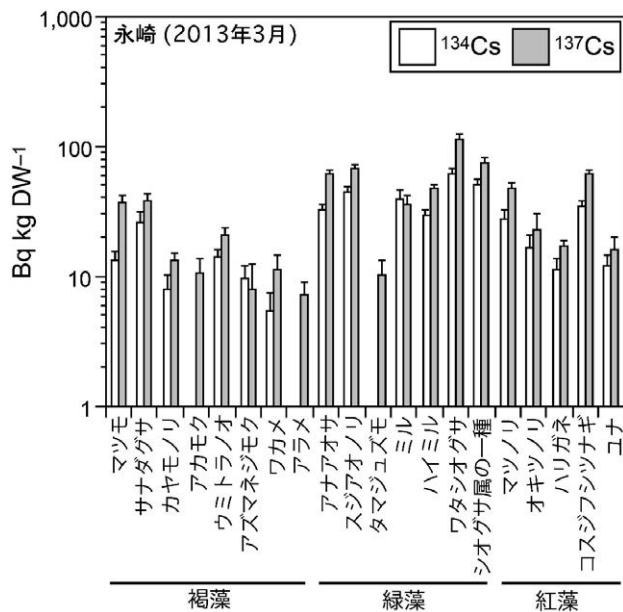


図9 2013年3月に福島県いわき市永崎において採集された海藻類の¹³⁴Csおよび¹³⁷Cの放射能強度。測定は神戸大学で実施。

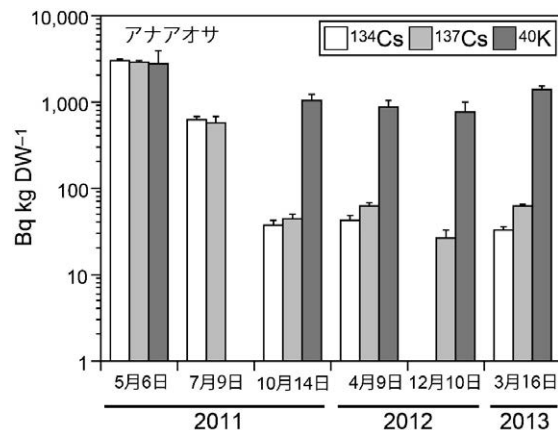


図10 福島県いわき市永崎において採集した一年生緑藻アオサにおける¹³⁴Cs、¹³⁷Cおよび⁴⁰Kの放射能強度の推移。

一方、⁴⁰K の放射能強度は2011年5月の試料ではやや高い傾向を示したが、その後の試料では約1,000-1,500 Bq kg⁻¹で、ほぼ一定の値を示した。1年生褐藻のワカメ (図11) とアカモクは¹³⁷Cs の放射能強度変化では類似した傾向を示し、1年目に顕著な減少を示し、その後も2013年3月まで連続的に減少した。ワカメの⁴⁰K の放射能強度は千葉県および兵庫県の実験試料で1,840-1,990 Bq kg⁻¹ (図11)であった。

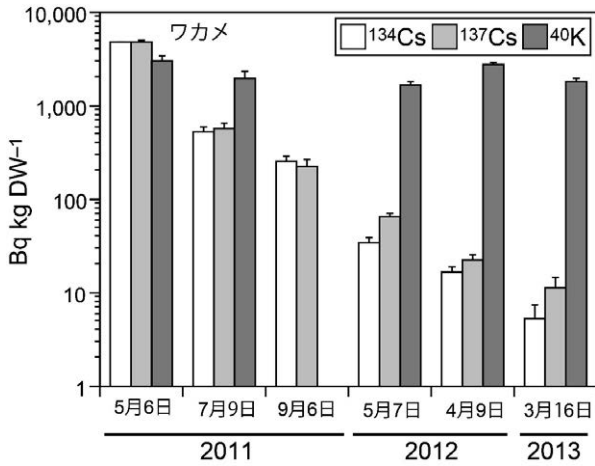


図11 福島県いわき市永崎において採集した一年生褐藻ワカメにおける¹³⁴Cs、¹³⁷Cおよび⁴⁰Kの放射能強度の推移。

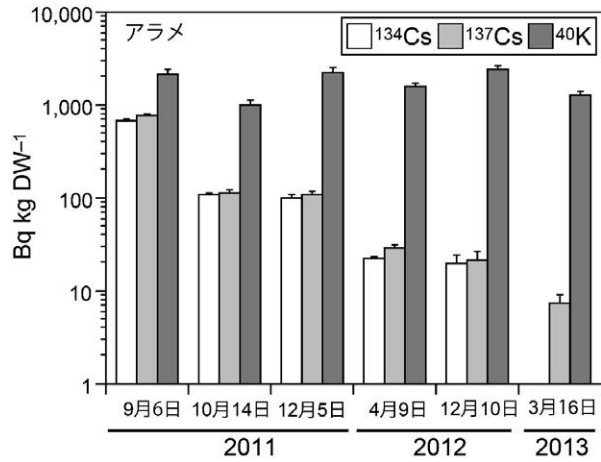


図12 福島県いわき市永崎において採集した多年生褐藻アラメにおける¹³⁴Cs、¹³⁷Cおよび⁴⁰Kの放射能強度の推移。

アラメ（図12）やアズマネジモク（図13）などの多年生褐藻は福島県周辺の沿岸の藻場の重要な構成要素であるが、¹³⁷Csの放射能強度変化では上述の一年生の海藻類と類似した傾向を示したが、⁴⁰Kの放射能強度は約1,500-2,000 Bq kg⁻¹とアオサよりやや高い値を示した（図11）。千葉県で採集された褐藻アラメ、アズマネジモクの⁴⁰Kの放射能強度は、1,650-1,750 および1,180 Bq kg⁻¹で福島県における測定結果とほぼ同様であった（図12, 13）。残念ながら季節毎に採集することができた紅藻類は少なかったが、ハリガネ（図14）は2011年に¹³⁷Csの放射能強度が顕著に減少したが、2013年3月でも約10 Bq kg⁻¹と検出可能な強度の範囲にとどまった。一方、⁴⁰Kの放射能強度は800-1,000 Bq kg⁻¹で緑藻アオサと同程度であったが、褐藻ワカメ、アラメ、ホンダワラ類などと比較すると顕著に低い値を示した。

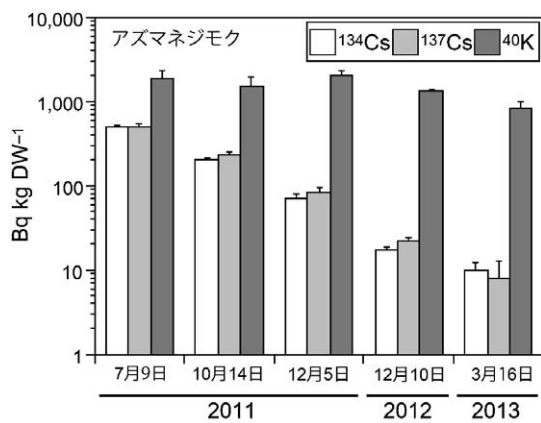


図13 福島県いわき市永崎において採集した多年生褐藻アズマネジモクにおける¹³⁴Cs、¹³⁷Cおよび⁴⁰Kの放射能強度の推移。

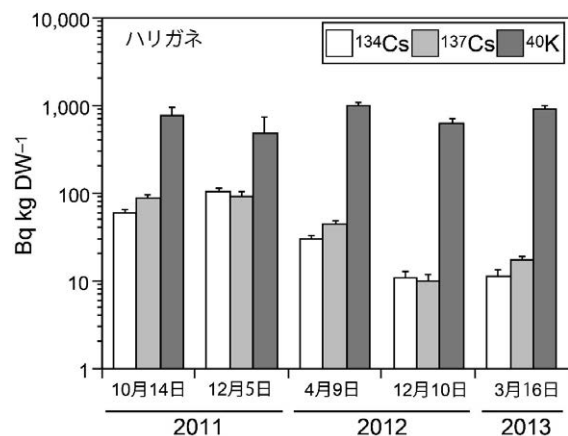


図14 福島県いわき市永崎において採集した多年生紅藻ハリガネにおける¹³⁴Cs、¹³⁷Cおよび⁴⁰Kの放射能強度の推移。

4. 考察

福島第一原発の事故以前の本州東海岸における沿岸海水の ^{137}Cs 放射能強度は $1\text{--}3\text{ Bq m}^{-3}$ で、外洋の表層水の放射能強度とほぼ同等であった (Nakanishi et al. 2010)。一方、事故後の原発から30 km圏の放射能強度は 10 Bq L^{-1} を超えていた (Bailly du Bois et al. 2012)。

事故後の大量排水から約1ヶ月经過後のいわき市塩屋崎および永崎沿岸の海水に含まれる ^{137}Cs の放射能強度は約 $8\text{--}10\text{ Bq L}^{-1}$ であった(図4)。この値は、Bailly du Bois et al. (2012) で示されている測定結果に概ね一致する。一方、塩屋崎及び永崎の周辺の沿岸は、この論文で示されている放射性物質濃度の水平分布推定図から判断すると、2011年4月15日から5月1日頃の2週間程度にわたって、約 60 Bq L^{-1} の汚染水にさらされていたことになる。

福島第一原発から直接流出した汚染水の影響は、2011年3月26日から4月8日にかけて特に著しく、2011年4月10日以降に福島第一原発周辺で測定された海水中の放射能強度は減少している。多年生の褐藻アラメに含まれる放射性物質の放射能強度は、この海水中の汚染物質の推移と類似した傾向を示したが、紅藻ハリガネはこれとは異なり、2012年12月、2013年3月の間もほぼ同様の放射能強度を示した。一方、 ^{40}K の値は調査期間を通じて概ね一定であり、またその値は対照とした千葉県や兵庫県で採集された標本とほぼ一致したことから、 ^{40}K は人為的な原因によるものではないことが確認された。

本調査の測定結果および Bailly du Bois et al. (2012)で示されるように、2011年4月における塩屋崎および永崎での海水中の ^{137}Cs 放射能強度が $10\text{ to }60\text{ Bq L}^{-1}$ であったとすると、2011年5月に採集された同沿岸の海藻類の ^{137}Cs 放射能強度は約 $5,000\text{ Bq kg}^{-1}$ であったことから、(測定を行った乾燥試料で放射能強度が80-500倍で、湿重量/乾重量比を10とした場合)これらの海藻類はその組織内に約8-50倍の濃度の ^{137}Cs を蓄積していたことになる。一方、海藻類の成長速度は種類によって異なるが、かなり成長が速いアオサ類やワカメを例にとってもその成長期間は1ヶ月より長く、多くの種では3-4ヶ月である。このため、2011年5月初旬(5月2日および5月6日)に採集された試料の藻体組織のかなりの部分は、周囲の海水が高濃度の汚染水によって汚染されるより前に形成されていたことになる。このことから、先に述べた海藻類の組織における濃縮率推定値は、実際にはより高い可能性がある。

この海藻類のCs濃縮率推定値(約8-50)はIAEA (2004)で示されている海藻類の濃縮率(約30-50)と概ね一致する。先に述べたように、海藻類の実際の濃縮率はこれよりもやや高いと考えるが、海藻類の採集時期より前の海藻類の成長時期(2011年4月下旬)に、海藻類が生育している海岸線の直近では汚染水の濃度が推定値よりさらに高かった可能性も考えられる。

採集直後に直接乾燥させた試料(風乾後、加熱乾燥:表1における試料k001, k004など)と、いったん凍結した後に乾燥させた試料(凍結、解凍、風乾、加熱乾燥:k017,

k023など)の ^{137}Cs 放射能強度は、概ね一致した。しかし、解凍時に海藻類の組織から流出する融解水(k048-k051)に含まれる ^{137}Cs 放射能強度は、分類群によって大きな違いが見られた(褐藻ワカメ 40Bq L^{-1} , アラメ 800Bq L^{-1})が、解凍した海藻組織に含まれる ^{137}Cs より高い放射能強度を示すことが多かった。この値は2011年7月初旬の周辺海域の海水中の ^{137}Cs が、本調査における検出限界である約 1 Bq L^{-1} より低かったことを考えると顕著に高く、同時期に採集された藻体の測定結果から推定した、海藻類の生組織中に含まれる放射性物質の濃度に近いものであった。このため、筆者らは凍結した試料を融解・乾燥させた測定結果は、実際の藻体中の濃度より低い数値となる可能性がある」と結論した。

海藻類が一般に成長が速く、また世代時間が短いことを考えると2011年夏季に海藻類の放射性Csの放射能強度が速やかに減少したことは理解できる。多くの一年生海藻類(褐藻カヤモノリ, 緑藻ヒトエグサ, 紅藻アマノリ類など)はその生活史型にかかわらず各個体の生育期間は6ヶ月にみえない(図15)。多くの種(褐藻ワカメ, カヤモノリ, 緑藻ヒトエグサ, 紅藻スサビノリなど)は異形の世代交代を示し、大形の藻体をつくる世代は夏から秋にかけては観察されない(Bold and Wynne 1985, Hori et al. 1993, 1994, Graham & Wilcox 2000)。このような場合、2011年3月下旬から4月にかけての海水中の放射性物質の濃度が高い時期に成長した海藻組織は、その後の成長で新たに形成された組織と一部でおきかわり、また最終的には2011年夏季から秋季にかけて消失していたと考えられる。

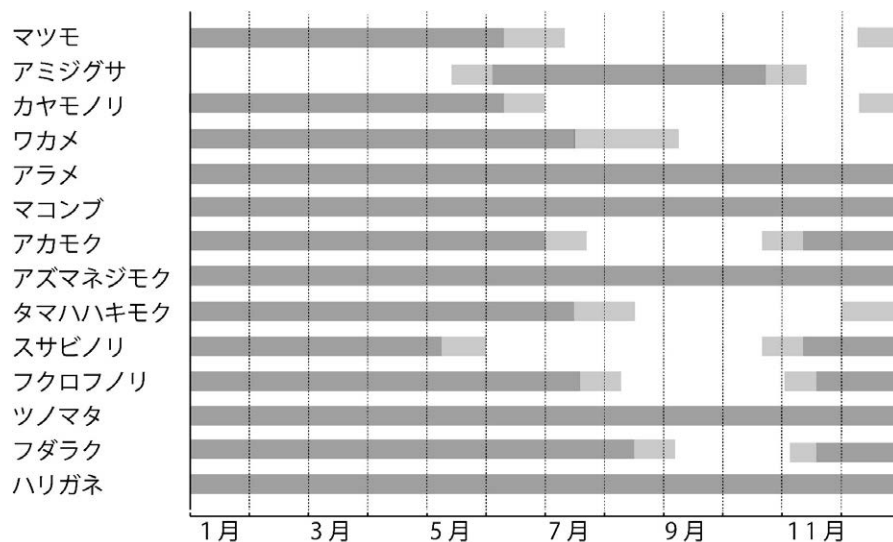


図15 福島県いわき市およびその周辺に生育する海藻類の生育期間と季節的消長。

一部の異形世代交代を示す種、たとえば褐藻アラメ、マコンブなどには多年生のものが含まれ、この場合には藻体の一部は夏季を通して残存する。しかし、このようなコンブ目の種は葉状部と茎状部の移行帯に介生成長する成長帯をもっており、藻体上部の古い葉状部は数ヶ月のうちには先端から失われていく (Bold & Wynne 1985)。その他の多くの種、たとえば緑藻アオサ類、褐藻アミジグサ、アツバコモングサ、紅藻ツノマタ類、フクロフノリ、ハリガネなど)はほぼ同じ形態をした大形の藻体が交代する

同形の世代交代を示すが、この場合でも1つの世代の生育期間は6ヶ月にみえない。

一部の種、たとえば緑藻ミル類、褐藻ホンダワラ類はその生活史型において世代交代がみられず、このうちホンダワラ類のアカモクは冬季から春季にかけて大形化する一年生で、アズマネジモクは春季から夏季にかけて大形化する多年生である。このため、2011年秋季以降に採集された海藻類（その藻体を構成している組織）は周辺海水中の放射性物質の濃度が急速に減少した時期以降に海水中の栄養塩（とCs）を吸収しながら成長したことになる。しかし、2012年の冬季以降、海水中の ^{134}Cs および ^{137}Cs の放射能強度は概ね一定であり、ほとんどの海藻類で2013年春季においても、 ^{137}Cs で約 $8\text{-}140\text{ Bq kg}^{-1}$ の放射能強度を示し、検出可能であった。このことは、海藻類のCs濃縮率が本調査の結果で $8\text{-}50$ 、IAEAの報告で 50 であったことから、濃縮率 50 を用いるとこれらの海藻類の生育場所では海水中に $0.02\text{-}0.3\text{ Bq L}^{-1}$ の ^{37}Cs が存在していたことになる。海水中の ^{134}Cs および ^{137}Cs の検出限界は、測定を行う機関により 0.00008 Bq L^{-1} から 1.2 Bq L^{-1} と大きく異なるが、いずれにせよこの時期の海水中に含まれる放射性物質の放射能強度（ $0.02\text{-}0.3\text{ Bq L}^{-1}$ ）はいくつかの測定機関の検出限界に近い。



図16 a, 震災直後（2011年5月）の福島県いわき市永崎海岸; b, 同塩屋崎海岸; c, d, 震災約1年後（2012年4月）のいわき市永崎海岸潮間帯; 震災約1年半後（2012年12月）の永崎海岸漸深帯消波ブロック; f, 採集された海藻類; g, 実験室でソーティングされ風乾中の海藻類; h, 乾燥・粉碎後U-8サンプルカップに充填した海藻試料。

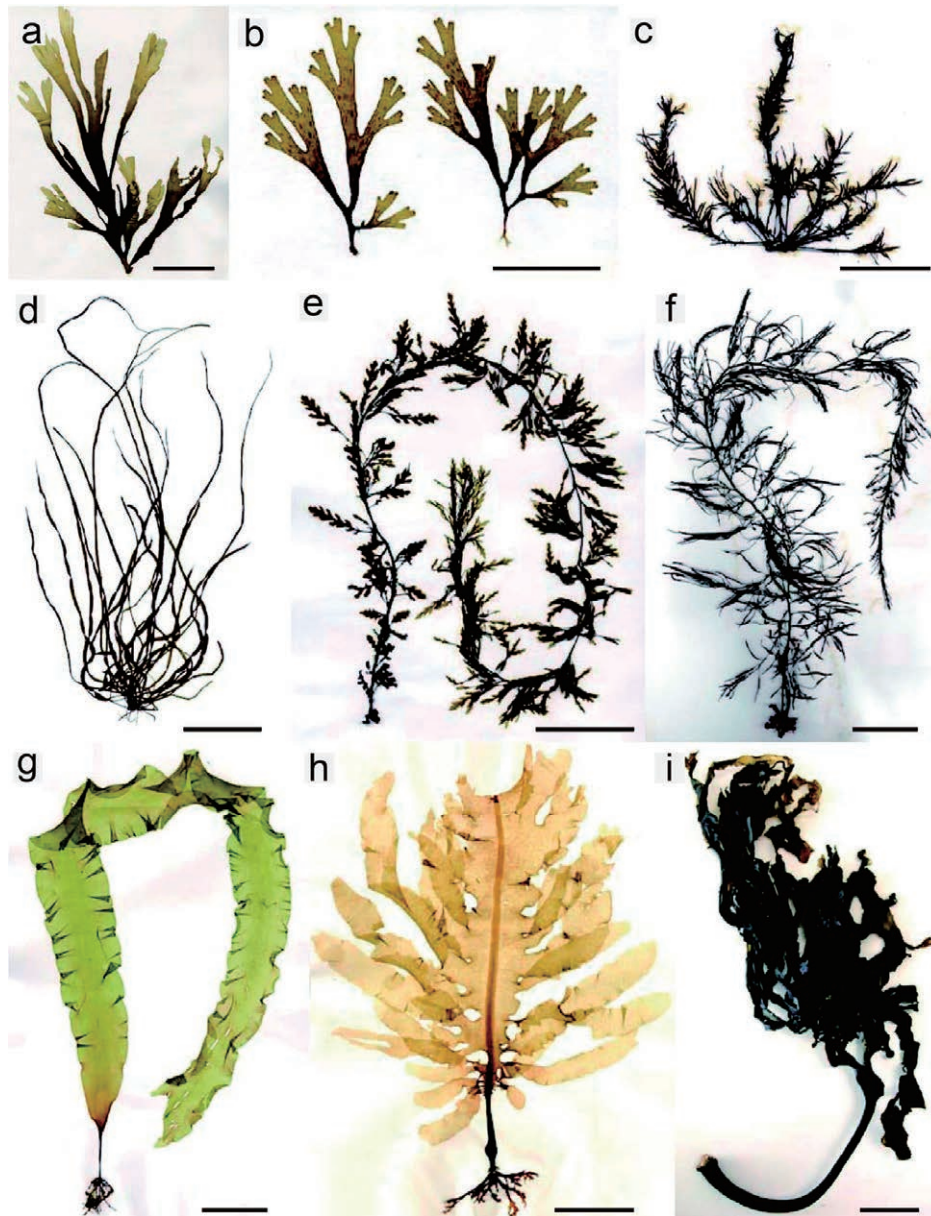


図17 福島県いわき市周辺で一般に見られる海藻類（褐藻）。a, コモングサ; b, アミジグサ; c, マツモ; d, カヤモノリ; e, アカモク; f, アズマネジモク; g, マコンブ; h, ワカメ; i, アラメ。スケールバー：5 cm。

海藻類が金属イオンを濃縮する性質を持つことから、地点毎の海藻類中の金属イオン濃度を測定・比較することで、それらの海藻類が生育する場所の海水中の金属イオン濃度の地理的な分布を推定できることが報告されてきた（アオサ類, Caliceti et al. (2002), Haritonidis & Malea (1999) : ワカメ, Yamada et al. (2007))。これらの報告と同様に、海藻類は広く¹³⁷Csを比較的高濃度（濃縮率約8-50）に濃縮するが、その成長が速くその時期の海水の状況を反映すること、また一次生産者であることから生物濃縮による影響を受けないことなどから、沿岸域における海水中の¹³⁷Csの濃度をモニタリングする生物種として適していると考えられる。

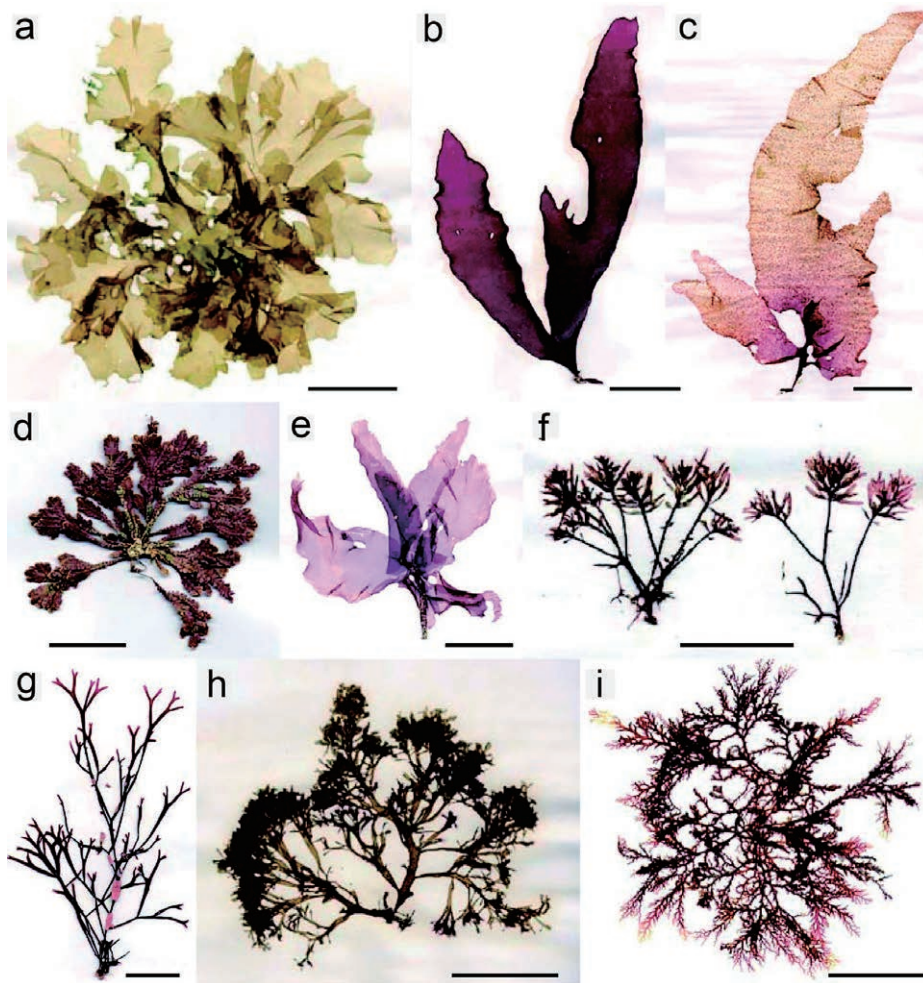


図18 福島県いわき市周辺で一般に見られる海藻類 (a, 緑藻; b-i, 紅藻)。a, アナアオサ; b, フダラク; c, アカバギンナンソウ; d, エゾシコロ; e, スサビノリ; f, イソマツ; g, ハリガネ; h, ユナ; i, ユカリ。スケールバー : 5 cm。

謝辞

本研究を行うにあたって、海藻試料の放射性強度測定・資料整理においては神戸大学小宮山千代、小谷朋子両氏にお世話になった。また、海藻試料の採集においては福島県水産試験場和田敏裕、岩崎高資、平川直人各氏のご協力を得た。また、本研究は神戸大学自然科学系先端融合研究環の震災関連研究支援費による支援を頂いた。

引用文献

- Bailly du Bois, P., Laguionie, P., Boust, D., Korsakissok, I., Didier, D., Fiévet, B. 2012. Estimation of marine source-term following Fukushima Dai-ichi accident. *J. Env. Radioactivity* 114: 2-9.
- Bold, H.C., Wynne, M.J. 1985. *Introduction to the Algae: Structure and reproduction*. 2nd ed.

- Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA, 720 pp.
- Buesseler, K., Aoyama, M., Fukasawa, M. 2011. Impacts of the Fukushima nuclear power plants on marine radioactivity. *Env. Sci. Tech.* 45 (23): 9931–9935.
- Caliceti, M., Argese, E., Sfriso, A., Pavoni, B. 2002. Heavy metal contamination in the seaweeds of the Venice lagoon. *Chemosphere* 47: 443–454.
- Coughtrey, P.J., Thorne, M.C. 1983. Radionuclide distribution and transport in terrestrial and aquatic ecosystems. A critical review of data. Vol. 1 A.A. Balkema, Rotterdam, 496 pp.
- Estournel, C., Bosc, E., Bocquet, M., Ulses, C., Marsaleix, P., Winiarec, V., Osvath, I., Nguyen, C., Duhaut T., Lyard, F., Michaud, H., Auclair, F. 2012. Assessment of the amount of Cesium-137 released into the Pacific Ocean after the Fukushima accident and analysis of its dispersion in Japanese coastal waters. *J. Geophys. Res.* 117, C11 10.1029/2012JC007933
- Graham, L.E., Wilcox, L.W. 2000. *Algae*. Prentice-Hall, London 640 pp.
- Haritonidis, S., Malea, P. 1999. Bioaccumulation of metals by the green alga *Ulva rigida* from Thermaikos Gulf, Greece. *Environ. Poll.* 104: 365–372.
- Hori, T. 1993. *An Illustrated Atlas of the Life History of Algae. Vol. 2. Brown and Red Algae*. Tokyo: Uchida Rokakuho, 345 pp.
- Hori, T. 1994. *An Illustrated Atlas of the Life History of Algae. Vol. 1. Green Algae*. Tokyo: Uchida Rokakuho, 367 pp.
- International Atomic Energy Agency 2004. Sediment distribution coefficients and concentration factors for biota in the marine environment. IAEA Technical Reports Series No. 422. IAEA Vienna.
- Ikeuchi, Y. 2003. Temporal variations of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs concentrations in Japanese coastal surface seawater and sediments from 1974 to 1998. *Deep-Sea Res.* 50: 2713–2726.
- Kanda, J. 2013. Continuing ¹³⁷Cs release to the sea from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant through 2012. *Biogeosciences Discuss.* 10: 3577–3595.
- Kanter, U., Hauser, A., Michalke, B., Dräxl, S., Schäffner, A.R. 2010. Caesium and strontium accumulation in shoots of *Arabidopsis thaliana*: genetic and physiological aspects. *J. Exp. Bot.* 61: 3995–4009.
- Kawamura, H., Kobayashi, T., Furuno, A., Ishikawa, Y., Nakayama, T., Shima, S., Awaji, T. 2011. Preliminary numerical experiments on oceanic dispersion of ¹³¹I and ¹³⁷Cs discharged into the ocean because of the Fukushima Daiichi nuclear power plant disaster. *J. Nucl. Sci. Technol.* 48: 1349–1356.
- Linsley, G., Sjoblom, K., Cebianca, T. 2005. Overview of point source of anthropogenic radionuclides in the oceans, vol. 6. Chapter 4, issues 17–21, 109–138.
- Mimura, T., Mimura, M., Komiyama, C., Miyamoto, M., Kitamura, A. 2014. Measurements of gamma (γ)-emitting radionuclides with a high-purity germanium detector: the methods and reliability of our environmental assessments on the Fukushima 1 Nuclear Power Plant accident. *J. Plant Res.* DOI 10.1007/s10265-013-0594-y.

- Miyazawa, Y., Masumoto, Y., Varamov, S.M., Miyama, T., Takigawa, M., Honda, M., Seino, T. 2012. Inverse estimation of source parameters of oceanic radioactivity dispersion models associated with the Fukushima accident. *Biogeosciences Discuss.* 9: 13783–13816.
- Morita, T., Fujimoto, K., Kasai, H., Yamada, H., Nishiuchi, K. 2010. Temporal variations of ^{90}Sr and ^{137}Cs concentrations and the $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ activity ratio in marine brown algae, *Undaria pinnatifida* and *Laminaria longissima*, collected in coastal areas of Japan. *J. Environ. Monit.* 12: 1179–1186.
- Morris, E.R., Rees, D.A., Robinson, G. 1980. Cation-specific aggregation of carrageenan helices: domain model of polymer gel structure. *J. Mol. Biol.* 138: 349–362.
- Nakanishi, T., Aono, T., Yamada, M., Kusakabe, M. 2010. Temporal and spatial variations of ^{137}Cs in the waters off a nuclear fuel reprocessing facility in Rokkasho, Aomori, Japan. *J. Radioanal Nucl. Chem.* 283: 831–838.
- Pentreath, R.J. 1976. Monitoring of radionuclides. Fish Tech Paper 150, FAO Rome.
- Povinec, P.P., Hirose, K., Honda, T., Ito, T., Scott, E.M., Togawa, O. 2004. Spatial distribution of ^3H , ^{90}Sr , ^{137}Cs and $^{239,240}\text{Pu}$ in surface waters of the Pacific and Indian Oceans—GLOMARD database. *J. Envir. Radioact.* 76 (1–2): 113–137.
- Tateda, Y., Koyanagi, T. 1994. Concentration factors for Cs-137 in marine algae from Japanese coastal waters. *J. Radiat. Res.* 35: 213–221.
- Tsumune, D., Tsubono, T., Aoyama, M., Hirose, K. 2012. Distribution of oceanic ^{137}Cs from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant simulated numerically by a regional ocean model. *J. Environ. Radioact.* 111: 100–108.
- Yamada, M., Yamamoto, K., Ushihara, Y., Kawai, H. 2007. Variation in metal concentrations in the brown alga *Undaria pinnatifida* in Osaka Bay, Japan. *Phycol. Res.* 55: 222–230.
- Zhu, Y.-G., Smolders, E. 2000. Plant uptake of radiocaesium: a review of mechanisms, regulation and application. *J. Exp. Bot.* 51: 1635–1645.

注：本稿は日本植物学会英文誌 Journal of Plant Research (JPR) Symposiumに掲載予定（オンライン公表済み、オープンアクセス）の原稿を和訳・一部改変したものである。

H. Kawai, Kitamura, A., Mimura, M., Mimura, T., Tahara, T., Aida, D., Sato, K., Sasaki, H. (2013 online/2014 print) Radioactive cesium accumulation in seaweeds by the Fukushima 1 Nuclear Power Plant accident—two years' monitoring at Iwaki and its vicinity. *J. Plant Res.*, DOI: 10.1007/s10265-013-0603-1; Print ISSN 0918-9440; Online ISSN 1618-0860.

<http://link.springer.com/article/10.1007/s10265-013-0603-1>

表 1 神戸大学において測定した ^{134}Cs , ^{137}Cs and ^{40}K の測定結果

Sample code	Collection date	Taxonomy		Locality	Note (sample preparation and nature of samples)	^{134}Cs		^{137}Cs		^{40}K				
		Class	Order			Species	Bq kg $^{-1}$	Error	Detect. limit	Bq kg $^{-1}$	Error	Detect. limit	Bq kg $^{-1}$	Error
k001	9 July 2011	Phaeophyceae	Laminariales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Fertile thalli, directly dried	320.57	16.07	0.012	346.14	22.70	0.009	1,132.70	310.81	0.282
k002	2 May 2011	Phaeophyceae	Laminariales	Shioyazaki, Iwaki, Fukushima	Frozen	5,406.70	68.22	0.029	5557.90	93.10	0.020	2,494.30	375.95	0.309
k003	2 May 2011	Ulvoephyceae	Ulvales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Frozen	3,009.50	97.10	0.054	2897.80	122.56	0.042	2,780.80	1013.30	0.942
k004	9 July 2011	Ulvoephyceae	Ulvales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	487.54	58.31	0.051	567.83	74.20	0.046	n.d.	n.d.	1.381
k005	2 May 2011	Phaeophyceae	Fucales	Shioyazaki, Iwaki, Fukushima	Frozen	4,151.90	60.11	0.026	4239.90	81.19	0.020	2,507.50	384.80	0.315
k006	2 May 2011	Phaeophyceae	Ectocarpales s.l.	Shioyazaki, Iwaki, Fukushima	Frozen	5,417.10	131.01	0.073	5672.50	172.27	0.041	n.d.	n.d.	1.013
k007	6 May 2011	Phaeophyceae	Ectocarpales s.l.	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Frozen	4,544.90	69.54	0.031	4616.00	93.95	0.021	n.d.	n.d.	0.376
k008	2 May 2011	Phaeophyceae	Fucales	Shioyazaki, Iwaki, Fukushima	Frozen	3,991.30	98.26	0.049	4282.40	132.04	0.038	1,981.80	808.57	0.760
k009	2 May 2011	Ulvoephyceae	Ulvales	Shioyazaki, Iwaki, Fukushima	Frozen	4,231.90	138.52	0.070	4340.20	182.55	0.062	n.d.	n.d.	1.409
k010	2 May 2011	Phaeophyceae	Laminariales	Shioyazaki, Iwaki, Fukushima	Frozen	7,433.50	133.33	0.060	7371.20	173.95	0.047	1,152.20	799.52	0.800
k011	9 July 2011	Phaeophyceae	Laminariales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Juvenile thalli, directly dried	529.92	48.56	0.160	569.08	60.43	0.142	n.d.	n.d.	3.396
k012	9 July 2011	Phaeophyceae	Fucales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Basal portion, directly dried	457.65	22.24	0.053	501.06	29.90	0.044	2,867.30	411.99	1.061
k013	2 May 2011	Ulvoephyceae	Ulvales	Shioyazaki, Iwaki, Fukushima	Frozen	5,516.50	128.99	0.073	5433.80	165.31	0.038	n.d.	n.d.	0.944
k014	6 May 2011	Rhodophyceae	Gigartinales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Frozen	691.86	23.50	0.015	767.37	32.90	0.012	371.85	260.95	0.257
k015	6 May 2011	Phaeophyceae	Laminariales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Frozen	4,690.00	71.89	0.031	4810.30	96.65	0.023	2,957.80	462.11	0.383
k016	9 July 2011	Rhodophyceae	Gigartinales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	318.48	28.83	0.106	352.40	36.17	0.090	n.d.	n.d.	2.073
k017	9 July 2011	Ulvoephyceae	Ulvales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Frozen	606.50	66.73	0.200	576.93	85.96	0.199	n.d.	n.d.	5.182
k018	9 July 2011	Phaeophyceae	Fucales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Tip portion, directly dried	340.77	21.65	0.018	321.15	26.71	0.016	4,783.70	525.79	1.280
k019	9 July 2011	Phaeophyceae	Laminariales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	426.87	37.52	0.136	425.32	45.34	0.097	n.d.	n.d.	2.638
k020	9 July 2011	Phaeophyceae	Fucales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	499.62	25.71	0.064	498.74	33.71	0.061	1,871.40	446.75	1.295
k023	9 July 2011	Phaeophyceae	Laminariales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Fertile thalli, frozen	278.38	16.89	0.045	292.40	21.88	0.038	1,987.90	355.52	0.976

表 1 continued

Sample code	Collection date	Taxonomy		Locality	Note (sample preparation and nature of samples)	¹³⁴ Cs		¹³⁷ Cs		⁴⁰ K					
		Class	Order			Species	Bq kg ⁻¹	Error	Detect. limit	Bq kg ⁻¹	Error	Detect. limit	Bq kg ⁻¹	Error	Detect. limit
k024	17 May 2011	Phaeophyceae	Fucales	<i>Sargassum muticum</i>	Iwaya, Awaji Isl., Hyogo	Directly dried	n.d.	0.00	0.002	n.d.	0.00	0.003	2,768.80	25.04	–
k025	17 May 2011	Phaeophyceae	Laminariales	<i>Undaria pinnatifida</i>	Iwaya, Awaji Isl., Hyogo	Directly dried	n.d.	0.00	0.001	n.d.	0.00	0.001	1,841.80	34.15	0.029
k026	31 May 2011	Phaeophyceae	Ectocarpales s.l.	<i>Colpomenia sinuosa</i>	Iwaya, Awaji Isl., Hyogo	Directly dried	n.d.	0.00	0.001	n.d.	0.00	0.001	496.50	45.30	0.042
k027	31 May 2011	Ulvoiphyceae	Ulvaes	<i>Ulva pertusa</i>	Iwaya, Awaji Isl., Hyogo	Directly dried	n.d.	0.00	0.001	n.d.	0.00	0.001	1,147.60	42.53	0.037
k028	30 May 2011	Phaeophyceae	Ectocarpales s.l.	<i>Scytosiphon lomentaria</i>	Iwaya, Awaji Isl., Hyogo	Directly dried	n.d.	0.00	0.007	n.d.	0.00	0.005	1,955.90	188.09	0.176
k029	6 September 2011	Phaeophyceae	Laminariales	<i>Eisenia bicyclis</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	681.86	20.68	0.043	773.22	30.83	0.034	2,115.40	278.58	0.703
k030	6 September 2011	Ulvoiphyceae	Ulvaes	<i>Ulva pertusa</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	n.d.	0.00	0.220	202.85	43.48	0.158	n.d.	n.d.	4.519
k031	6 September 2011	Phaeophyceae	Laminariales	<i>Saccharina japonica</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Juvenile thallus, directly dried	193.70	25.07	0.097	230.31	36.71	0.086	4,214.10	860.98	2.389
k032	6 September 2011	Phaeophyceae	Laminariales	<i>Undaria pinnatifida</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Old sporophyll, directly dried	255.02	31.38	0.121	224.34	36.26	0.108	n.d.	n.d.	2.716
k035	14 October 2011	Rhodophyceae	Gigartinales	<i>Hypnea asiatica</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	114.04	28.88	0.045	161.96	28.91	0.039	2,423.00	1144.60	1.108
k036	14 October 2011	Ulvoiphyceae	Ulvaes	<i>Ulva pertusa</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	36.56	4.75	0.006	43.05	6.67	0.007	1,013.10	194.79	0.177
k037	14 October 2011	Phaeophyceae	Laminariales	<i>Saccharina japonica</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	57.64	4.20	0.005	67.41	6.09	0.005	1,120.30	158.44	0.137
k038	14 October 2011	Phaeophyceae	Laminariales	<i>Eisenia bicyclis</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	51.42	9.67	0.014	64.29	10.74	0.013	1,380.30	372.98	0.348
k039	14 October 2011	Phaeophyceae	Laminariales	<i>Eisenia bicyclis</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Mature thalli, directly dried	105.99	4.78	0.004	114.00	6.66	0.004	995.04	126.90	0.109
k040	14 October 2011	Rhodophyceae	Gigartinales	<i>Neodilsea yendoana</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	53.92	6.21	0.009	68.46	8.43	0.007	1,550.90	264.19	0.233
k041	14 October 2011	Phaeophyceae	Fucales	<i>Sargassum yamadae</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	200.17	14.01	0.013	229.20	17.54	0.012	1,522.60	401.82	0.380
k042	14 October 2011	Rhodophyceae	Gigartinales	<i>Amphiletops paradoxa</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	59.91	5.33	0.007	86.65	7.68	0.006	761.02	184.22	0.170
k043	14 October 2011	Phaeophyceae	Laminariales	<i>Eisenia bicyclis</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Juvenile thalli, directly dried	59.57	6.33	0.008	69.15	8.25	0.008	1,742.10	259.79	0.226
k045	14 October 2011	Rhodophyceae	Ceramiales	<i>Chondria crassicaulis</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	121.40	7.23	0.006	111.81	9.18	0.008	2,772.70	244.74	0.192
k046	2 May 2011	Seawater			Shioyazaki, Iwaki, Fukushima	Seawater	9.54	2.25	0.004	8.41	3.21	0.003	n.d.	n.d.	0.096
k047	2 May 2011	Seawater			Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Seawater	11.27	2.15	0.003	9.74	3.43	0.003	n.d.	n.d.	0.094

表 1 continued

Sample code	Collection date	Taxonomy		Locality	Note (sample preparation and nature of samples)	¹³⁴ Cs		¹³⁷ Cs		⁴⁰ K				
		Class	Order			Species	Bq kg ⁻¹	Error	Detect. limit	Bq kg ⁻¹	Error	Detect. limit	Bq kg ⁻¹	Error
k048	9 July 2011	Meltwater (dripping)		Nagasaki, Iwaki, Fukushima	From <i>Undaria pinnatifida</i>	39.48	3.10	0.003	42.21	4.05	0.003	340.45	97.78	0.091
k049	9 July 2011	Meltwater (dripping)		Nagasaki, Iwaki, Fukushima	From <i>Scytosiphon lomentaria</i>	344.71	8.63	0.005	383.09	12.01	0.005	n.d.	n.d.	0.120
k050	9 July 2011	Meltwater (dripping)		Shioyazaki, Iwaki, Fukushima	From <i>Sargassum thunbergii</i>	402.97	8.86	0.005	436.72	12.14	0.004	502.65	116.14	0.108
k051	9 July 2011	Meltwater (dripping)		Shioyazaki, Iwaki, Fukushima	From <i>Eisenia bicyclis</i>	697.87	11.19	0.006	809.50	16.20	0.005	440.83	113.32	0.106
k052	5 December 2011	Phaeophyceae	Laminariales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Juvenile thalli, directly dried	54.38	7.13	0.009	69.84	12.27	0.009	2,512.00	310.20	0.232
k053	5 December 2011	Phaeophyceae	Laminariales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	<i>Eisenia bicyclis</i>	96.84	8.52	0.007	106.11	12.00	0.010	2,258.50	275.40	0.210
k054	5 December 2011	Rhodophyceae	Gigartinales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	<i>Neodilsea yendoana</i>	45.30	7.30	0.010	40.58	13.32	0.012	1,082.40	281.80	0.249
k056	5 December 2011	Rhodophyceae	Corallinales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	<i>Calliarthron</i> sp.	25.56	5.17	0.007	34.10	8.95	0.007	n.d.	n.d.	0.197
k057	5 December 2011	Rhodophyceae	Ceramiales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	<i>Dasya sessilis</i>	219.43	22.28	0.022	234.59	29.33	0.021	4,101.20	705.21	0.592
k058	5 December 2011	Phaeophyceae	Fucales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	<i>Sargassum yamadai</i>	70.49	7.93	0.007	82.22	11.74	0.010	2,037.50	297.70	0.234
k059	5 December 2011	Rhodophyceae	Gigartinales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	<i>Amfillopsis paradoxa</i>	100.85	9.72	0.010	92.07	11.75	0.009	468.71	261.31	0.248
k060	5 December 2011	Phaeophyceae	Laminariales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	<i>Saccharina japonica</i>	67.14	7.07	0.007	78.82	10.21	0.008	1,793.10	259.95	0.209
k061	5 December 2011	Phaeophyceae	Laminariales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	<i>Saccharina japonica</i>	57.12	8.51	0.011	59.34	13.53	0.011	2,279.10	351.17	0.283
k062	5 December 2011	Phaeophyceae	Ralfsiales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	<i>Anatipus japonicus</i>	n.d.	0.00	0.048	197.20	41.70	0.042	n.d.	n.d.	1.285
k063	5 December 2011	Rhodophyceae	Gigartinales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	<i>Gloiopeltis furcata</i>	51.77	10.06	0.008	53.65	11.71	0.011	592.87	309.57	0.296
k064	7 March 2012	Phaeophyceae	Fucales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	<i>Sargassum homeri</i>	133.87	23.47	0.031	187.58	30.54	0.023	2,015.00	856.60	0.831
k065	7 March 2012	Rhodophyceae	Bangiales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	<i>Bangia fuscopurpurea</i>	160.51	8.98	0.009	226.22	13.80	0.009	936.70	256.60	0.240
k066	7 March 2012	Ulvophyceae	Ulvales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	<i>Ulva linza</i>	66.25	10.30	0.016	85.16	14.60	0.015	1,865.00	443.30	0.408
k067	7 March 2012	Phaeophyceae	Fucales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	<i>Sargassum thunbergii</i>	106.37	6.40	0.007	137.03	9.24	0.006	1,654.00	208.10	0.178
k068	7 March 2012	Phaeophyceae	Ectocarpales s.l.	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	<i>Scytosiphon lomentaria</i>	82.48	7.86	0.008	115.59	10.55	0.009	2,442.00	285.50	0.237

表 1 continued

Sample code	Collection date	Taxonomy		Locality	Note (sample preparation and nature of samples)	¹³⁴ Cs		¹³⁷ Cs		⁴⁰ K					
		Class	Order			Species	Bq kg ⁻¹	Error	Detect. limit	Bq kg ⁻¹	Error	Detect. limit	Bq kg ⁻¹	Error	Detect. limit
k069	7 March 2012	Rhodophyceae	Bangiales	<i>Pyropia yezoensis</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	24.47	4.78	0.008	51.06	9.61	0.008	1,195.00	252.30	0.230
k070	7 March 2012	Phaeophyceae	Ectocarpales s.l.	<i>Petalonia fascia</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	53.68	8.59	0.013	84.37	12.50	0.014	3,159.00	446.90	0.381
k071	7 March 2012	Ulvophyceae	Ulvales	<i>Monostroma nitidum</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	46.99	9.58	0.017	69.71	10.99	0.013	1,614.00	412.70	0.400
k072	7 March 2012	Phaeophyceae	Ralfsiales	<i>Anatipus japonicus</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	76.48	5.71	0.006	105.77	8.00	0.005	1,064.00	184.90	0.164
k073	7 March 2012	Phaeophyceae	Ralfsiales	<i>Anatipus japonicus</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	93.27	6.47	0.008	101.18	8.32	0.008	1,512.00	258.00	0.243
k074	7 March 2012	Phaeophyceae	Laminariales	<i>Undaria pinnatifida</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	33.69	4.58	0.005	62.91	6.44	0.005	1,642.00	178.60	0.148
k075	7 March 2012	Phaeophyceae	Laminariales	<i>Undaria pinnatifida</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	26.96	3.95	0.005	37.92	5.43	0.005	2,999.00	193.90	0.140
k076	9 April 2012	Phaeophyceae	Fucales	<i>Sargassum horneri</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	17.43	2.09	0.003	21.75	2.40	0.003	1,996.70	101.66	0.082
k077	9 April 2012	Ulvophyceae	Ulvales	<i>Ulva pertusa</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	42.63	4.35	0.006	60.71	5.65	0.006	862.87	172.48	0.164
k078	9 April 2012	Phaeophyceae	Laminariales	<i>Eisenia bicyclis</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	21.71	1.83	0.002	28.45	2.48	0.002	1,588.50	89.13	0.073
k079	9 April 2012	Phaeophyceae	Fucales	<i>Sargassum thunbergii</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	67.57	2.97	0.003	90.22	4.19	0.003	1,293.00	1016.60	0.088
k080	9 April 2012	Phaeophyceae	Desmarestiales	<i>Desmarestia ligulata</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	n.d.	0.00	0.007	n.d.	0.00	0.007	1,743.30	203.49	0.186
k081	9 April 2012	Phaeophyceae	Ectocarpales s.l.	<i>Scytosiphon lomentaria</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	48.66	2.99	0.003	71.76	4.17	0.003	1,603.20	115.51	0.099
k082	9 April 2012	Rhodophyceae	Rhodymeniales	<i>Lomentaria hakodatensis</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	157.82	3.96	0.003	221.71	6.00	0.003	897.33	95.59	0.086
k083	9 April 2012	Rhodophyceae	Bangiales	<i>Pyropia yezoensis</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	38.64	3.26	0.004	49.65	3.92	0.004	967.23	130.02	0.120
k084	9 April 2012	Rhodophyceae	Ceramiales	<i>Pterosiphonia pinulata</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	253.76	7.22	0.007	360.95	10.61	0.006	2,149.90	190.20	0.169
k085	9 April 2012	Rhodophyceae	Gigartinales	<i>Ahnfeltiopsis parvata</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	29.80	2.24	0.003	44.04	2.91	0.002	982.30	87.27	0.077
k086	9 April 2012	Phaeophyceae	Ectocarpales s.l.	<i>Colpomenia sinuosa</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	29.86	2.60	0.004	41.46	3.64	0.004	649.33	113.44	0.107
k087	9 April 2012	Phaeophyceae	Ectocarpales s.l.	<i>Colpomenia sinuosa</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	222.63	9.12	0.010	302.99	12.39	0.009	3,865.90	282.48	0.243
k088	9 April 2012	Phaeophyceae	Laminariales	<i>Saccharina japonica</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	10.05	1.89	0.003	15.28	2.59	0.003	1,988.00	103.71	0.084
k089	9 April 2012	Phaeophyceae	Ralfsiales	<i>Anatipus japonicus</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	53.89	2.75	0.003	77.91	3.90	0.003	983.29	95.03	0.085

表 1 continued

Sample code	Collection date	Taxonomy		Locality	Note (sample preparation and nature of samples)	¹³⁴ Cs		¹³⁷ Cs		⁴⁰ K					
		Class	Order			Species	Bq kg ⁻¹	Error	Detect. limit	Bq kg ⁻¹	Error	Detect. limit	Bq kg ⁻¹	Error	Detect. limit
k090	9 April 2012	Phaeophyceae	Laminariales	<i>Undaria pinnatifida</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	7.84	1.17	0.002	8.58	1.53	0.002	1,051.40	76.61	0.007
k091	9 April 2012	Phaeophyceae	Laminariales	<i>Undaria pinnatifida</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Juvenile thalli, directly dried	8.30	2.89	0.005	18.21	2.96	0.004	1,905.00	142.12	0.123
k092	9 April 2012	Phaeophyceae	Laminariales	<i>Undaria pinnatifida</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Sporophyll, directly dried	16.73	1.98	0.003	22.49	2.54	0.003	2,767.40	104.09	0.077
k093	10 April 2012	Phaeophyceae	Fucales	<i>Sargassum yamadae</i>	Yoshio, Katsuura, Chiba	Directly dried	n.d.	0.00	0.003	n.d.	0.00	0.003	1,184.00	102.98	0.091
k094	10 April 2012	Phaeophyceae	Laminariales	<i>Eisenia bicyclis</i>	Yoshio, Katsuura, Chiba	Directly dried	n.d.	0.00	0.002	n.d.	0.00	0.002	1,745.10	93.14	0.076
k095	10 April 2012	Phaeophyceae	Dictyotales	<i>Padina arborescens</i>	Yoshio, Katsuura, Chiba	Directly dried	n.d.	0.00	0.006	n.d.	0.00	0.006	1,579.40	183.42	0.166
k096	10 April 2012	Phaeophyceae	Laminariales	<i>Undaria pinnatifida</i>	Yoshio, Katsuura, Chiba	Directly dried	n.d.	0.00	0.003	n.d.	0.00	0.003	1,991.10	94.59	0.075
k097	10 April 2012	Phaeophyceae	Laminariales	<i>Eisenia bicyclis</i>	Kamogawa, Chiba	Directly dried	n.d.	0.00	0.003	n.d.	0.00	0.003	1,652.30	95.39	0.079
k098	10 April 2012	Phaeophyceae	Laminariales	<i>Ecklonia cava</i>	Kamogawa, Chiba	Directly dried	n.d.	0.00	0.003	n.d.	0.00	0.003	2,714.60	119.12	0.092
k099	10 April 2012	Phaeophyceae	Fucales	<i>Sargassum fusiforme</i>	Kamogawa, Chiba	Directly dried	n.d.	0.00	0.002	n.d.	0.00	0.002	3,236.60	91.82	0.061
k100	10 April 2012	Phaeophyceae	Laminariales	<i>Undaria pinnatifida</i>	Kamogawa, Chiba	Directly dried	n.d.	0.00	0.003	n.d.	0.00	0.003	1,922.90	103.42	0.084
k101	23 May 2012	Phaeophyceae	Fucales	<i>Sargassum horneri</i>	Terashima, Iwanuma, Miyagi	Directly dried	67.12	26.24	0.029	76.05	23.03	0.022	1,701.70	723.22	0.711
k102	23 May 2012	Ulvophyceae	Ulvales	<i>Ulva prolifera</i>	Terashima, Iwanuma, Miyagi	Directly dried	370.13	20.46	0.023	485.87	27.16	0.022	1,268.70	663.95	0.655
k103	23 May 2012	Phaeophyceae	Fucales	<i>Sargassum horneri</i>	Matsukawaura, Soma, Fukushima	Directly dried	55.55	2.55	0.003	81.23	3.75	0.003	1,619.50	97.97	0.081
k104	23 May 2012	Ulvophyceae	Ulvales	<i>Ulva pertusa</i>	Soma Port, Soma, Fukushima	Directly dried	n.d.	0.00	0.012	n.d.	0.00	0.011	449.78	329.17	0.329
k105	23 May 2012	Ulvophyceae	Ulvales	<i>Ulva pertusa</i>	Matsukawaura, Soma, Fukushima	Directly dried	21.80	3.16	0.004	26.03	3.99	0.004	1,015.10	157.70	0.148
k106	23 May 2012	Phaeophyceae	Desmarestiales	<i>Desmarestia ligulata</i>	Soma Port, Soma, Fukushima	Directly dried	n.d.	0.00	0.005	6.25	5.01	0.005	1,261.70	154.20	0.141
k107	23 May 2012	Phaeophyceae	Fucales	<i>Sargassum muticum</i>	Soma Port, Soma, Fukushima	Directly dried	n.d.	0.00	0.009	13.29	8.60	0.008	2,181.51	287.91	0.260
k108	23 May 2012	Rhodophyceae	Ceramiales	<i>Delesseria serrulata</i>	Soma Port, Soma, Fukushima	Directly dried	14.26	4.03	0.005	25.17	4.34	0.004	1,723.80	145.10	0.128
k109	9 April 2012	Ulvophyceae	Ulvales	<i>Monostroma nitidum</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	25.73	3.51	0.007	27.32	5.02	0.006	703.11	180.50	0.173

表 1 continued

Sample code	Collection date	Taxonomy		Locality	Note (sample preparation and nature of samples)	¹³⁴ Cs		¹³⁷ Cs		⁴⁰ K				
		Class	Order			Bq kg ⁻¹	Error	Bq kg ⁻¹	Error	Bq kg ⁻¹	Error	Detect. limit	Detect. limit	
kl10	23 May 2012	Rhodophyceae	Gigartinales	Matsukawaura, Soma, Fukushima	Directly dried	12.96	3.27	0.006	n.d.	0.00	0.005	825.74	168.62	0.160
kl11	23 May 2012	Rhodophyceae	Gigartinales	Matsukawaura, Soma, Fukushima	Directly dried	n.d.	0.00	0.004	n.d.	0.00	0.003	721.71	108.01	0.101
kl12	23 May 2012	Rhodophyceae	Gigartinales	Matsukawaura, Soma, Fukushima	Directly dried	19.68	6.73	0.007	17.97	7.14	0.007	882.64	216.67	0.210
kl13	23 May 2012	Rhodophyceae	Corallinales	Matsukawaura, Soma, Fukushima	Directly dried	60.91	4.66	0.006	90.92	6.23	0.006	1,165.70	177.93	0.167
kl15	23 May 2012	Phaeophyceae	Laminariales	Matsukawaura, Soma, Fukushima	Directly dried	49.35	2.50	0.003	54.70	3.31	0.003	1,428.50	99.27	0.008
kl16	9 December 2012	Ulvophyceae	Ulvales	Hirono, Futaba, Fukushima	Directly dried	36.73	3.03	0.004	54.46	4.98	0.004	0.00	0.00	0.209
kl17	9 December 2012	Rhodophyceae	Gigartinales	Hirono, Futaba, Fukushima	Directly dried	13.61	1.84	0.002	22.89	2.22	0.002	0.00	0.00	0.132
kl18	9 December 2012	Phaeophyceae	Ectocarpales s.l.	Hirono, Futaba, Fukushima	Directly dried	33.09	2.67	0.003	48.98	3.81	0.004	0.00	0.00	0.200
kl19	9 December 2012	Rhodophyceae	Gigartinales	Hirono, Futaba, Fukushima	Directly dried	13.66	2.15	0.002	n.d.	0.00	–	0.00	0.00	0.139
kl22	10 December 2012	Phaeophyceae	Fucales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	17.05	1.79	0.002	22.02	2.63	0.003	1,299.00	88.13	0.075
kl23	10 December 2012	Ulvophyceae	Ulvales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	n.d.	0.00	0.007	26.19	6.81	0.006	769.50	208.60	0.202
kl24	10 December 2012	Phaeophyceae	Laminariales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	n.d.	0.00	0.003	10.49	3.04	0.003	1,996.00	106.00	0.086
kl25	10 December 2012	Phaeophyceae	Laminariales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	19.62	3.96	0.004	21.56	4.08	0.005	2,457.00	160.10	0.135
kl28	10 December 2012	Phaeophyceae	Dictyotales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	41.53	2.92	0.004	68.91	5.62	0.004	2,484.00	147.10	0.121
kl30	10 December 2012	Rhodophyceae	Bangiales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	12.21	2.80	0.004	26.86	3.84	0.005	657.28	148.70	0.143
kl31	10 December 2012	Ulvophyceae	Ulvales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	n.d.	0.00	0.008	8.04	7.58	0.008	848.51	236.56	0.229
kl32	10 December 2012	Ulvophyceae	Cladophorales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	n.d.	0.00	0.007	n.d.	0.00	–	3,770.30	247.20	0.214
kl33	10 December 2012	Rhodophyceae	Gigartinales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	n.d.	0.00	0.003	6.68	3.58	0.004	677.03	112.57	0.106

表 1 continued

Sample code	Collection date	Taxonomy		Locality	Note (sample preparation and nature of samples)	¹³⁴ Cs		¹³⁷ Cs		⁴⁰ K					
		Class	Order			Species	Bq kg ⁻¹	Error	Detect. limit	Bq kg ⁻¹	Error	Detect. limit	Bq kg ⁻¹	Error	Detect. limit
kl134	10 December 2012	Rhodophyceae	Gigartinales	<i>Grateloupia turrituru</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	10.32	2.49	0.003	9.46	4.22	0.004	1,163.40	128.02	0.116
kl135	10 December 2012	Rhodophyceae	Gigartinales	<i>Ahnfeltiopsis paradoxa</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	10.64	2.14	0.002	9.84	1.87	0.003	604.94	81.66	0.076
kl138	10 December 2012	Rhodophyceae	Gigartinales	<i>Gloiopeltis furcata</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	64.95	8.00	0.014	92.33	12.25	0.013	5,190.10	427.40	0.376
kl139	10 December 2012	Rhodophyceae	Gigartinales	<i>Grateloupia lanceolata</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	n.d.	0.00	0.007	8.51	6.27	0.006	688.58	198.65	0.193
kl140	10 December 2012	Rhodophyceae	Gigartinales	<i>Plocamium cartilagineum</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	22.16	3.92	0.007	59.69	6.30	0.006	514.62	206.47	0.204
kl141	10 December 2012	Rhodophyceae	Ceramiales	<i>Chondria crassicaulis</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	41.82	4.62	0.005	47.81	5.45	0.006	3,859.40	213.11	0.174
kl142	9 December 2012	Phaeophyceae	Fucales	<i>Sargassum thunbergii</i>	Hisanohama, Iwaki, Fukushima	Directly dried	345.96	5.95	0.004	592.67	98.32	0.004	1,401.50	112.60	0.098
kl143	9 December 2012	Rhodophyceae	Gigartinales	<i>Chondrus giganteus</i>	Hisanohama, Iwaki, Fukushima	Directly dried	38.55	2.44	0.003	59.74	3.62	0.003	1,149.10	97.59	0.086
kl144	9 December 2012	Rhodophyceae	Gigartinales	<i>Chondrus giganteus</i>	Hisanohama, Iwaki, Fukushima	Directly dried	18.33	3.51	0.004	36.82	3.47	0.004	1,257.70	122.81	0.110
kl145	9 December 2012	Phaeophyceae	Fucales	<i>Sargassum muticum</i>	Hisanohama, Iwaki, Fukushima	Directly dried	123.97	4.21	0.004	209.89	6.76	0.004	1,503.30	1290.70	0.113
kl146	9 December 2012	Phaeophyceae	Fucales	<i>Sargassum fusiforme</i>	Hisanohama, Iwaki, Fukushima	Directly dried	21.49	1.86	0.003	34.70	3.37	0.003	4,206.90	116.52	0.078
kl147	9 December 2012	Phaeophyceae	Ectocarpales s.l.	<i>Colpomenia sinuosa</i>	Hisanohama, Iwaki, Fukushima	Directly dried	219.97	4.88	0.004	363.65	7.70	0.003	3,025.40	122.48	0.093
kl148	9 December 2012	Phaeophyceae	Laminariales	<i>Saccharina japonica</i>	Hisanohama, Iwaki, Fukushima	Directly dried	33.55	2.71	0.003	60.87	35.82	0.003	3,479.60	118.90	0.086
kl149	9 December 2012	Phaeophyceae	Laminariales	<i>Saccharina japonica</i>	Hisanohama, Iwaki, Fukushima	Directly dried	34.03	2.82	0.003	54.74	3.61	0.003	3,218.60	122.46	0.091
kl150	9 December 2012	Rhodophyceae	Ceramiales	<i>Chondria crassicaulis</i>	Hisanohama, Iwaki, Fukushima	Directly dried	42.05	4.27	0.005	58.60	6.18	0.005	3,937.10	186.64	0.147
kl151	16 March 2013	Phaeophyceae	Fucales	<i>Sargassum horneri</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	n.d.	0.00	0.003	10.64	3.11	0.003	2,250.80	108.28	0.085
kl152	16 March 2013	Phaeophyceae	Fucales	<i>Sargassum yamadai</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	9.69	2.30	0.005	7.91	4.56	0.004	840.94	140.74	0.132

表 1 continued

Sample code	Collection date	Taxonomy		Locality	Note (sample preparation and nature of samples)	¹³⁴ Cs		¹³⁷ Cs		⁴⁰ K					
		Class	Order			Species	Bq kg ⁻¹	Error	Detect. limit	Bq kg ⁻¹	Error	Detect. limit	Bq kg ⁻¹	Error	Detect. limit
kl153	16 March 2013	Ulvoephyceae	Ulvales	<i>Ulva pertusa</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	9.79	1.87	0.003	19.12	3.24	0.003	1,453.10	117.82	0.103
kl154	16 March 2013	Phaeophyceae	Laminariales	<i>Eisenia bicyclis</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	n.d.	0.00		7.18	1.84	0.003	1,274.50	91.32	0.079
kl155	16 March 2013	Phaeophyceae	Fucales	<i>Sargassum thunbergii</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	13.92	2.35	0.003	20.90	2.88	0.003	1,738.20	124.22	0.106
kl156	16 March 2013	Rhodophyceae	Gigartinales	<i>Amphiletiopsis flabelliformis</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	16.71	3.77	0.008	22.80	7.53	0.007	1,349.40	230.51	0.217
kl158	16 March 2013	Rhodophyceae	Rhodymeniales	<i>Lomentaria hakodatensis</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	34.77	3.08	0.004	60.47	4.43	0.004	993.42	130.86	0.121
kl159	16 March 2013	Phaeophyceae	Dictyotales	<i>Pachydactyon coriaceum</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	26.23	4.94	0.007	38.11	5.35	0.007	1,494.50	229.91	0.216
kl160	16 March 2013	Ulvoephyceae	Cladophorales	<i>Cladophora</i> sp.	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	50.88	5.23	0.006	75.11	6.10	0.006	1,029.20	190.05	0.179
kl161	16 March 2013	Ulvoephyceae	Ulvales	<i>Ulva prolifera</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	44.66	4.58	0.006	67.05	5.66	0.006	1,218.00	182.82	0.172
kl162	16 March 2013	Ulvoephyceae	Cladophorales	<i>Chaetomorpha moniligera</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	n.d.	0.00	0.004	10.23	3.07	0.004	3,397.30	168.28	0.134
kl164	16 March 2013	Rhodophyceae	Gigartinales	<i>Amphiletiopsis paradoxa</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	11.31	2.13	0.002	16.85	2.18	0.002	902.53	85.45	0.076
kl165	16 March 2013	Rhodophyceae	Gigartinales	<i>Gloiopeltis furcata</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	n.d.	0.00	0.003	n.d.	0.00	0.003	534.66	105.28	0.100
kl166	16 March 2013	Rhodophyceae	Gigartinales	<i>Grateloupia lanceolata</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	n.d.	0.00	0.004	n.d.	0.00	0.004	601.26	125.92	0.120
kl167	16 March 2013	Rhodophyceae	Gigartinales	<i>Grateloupia lanceolata</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	n.d.	0.00	0.003	7.42	1.97	0.003	503.27	85.20	0.081
kl169	16 March 2013	Rhodophyceae	Gigartinales	<i>Polyopes affinis</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	27.53	4.41	0.004	48.01	4.06	0.004	533.00	133.37	0.128
kl170	16 March 2013	Rhodophyceae	Gigartinales	<i>Polyopes affinis</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	12.20	2.42	0.004	13.51	3.60	0.003	377.65	107.94	0.105
kl171	16 March 2013	Phaeophyceae	Ralfsiales	<i>Anatipus japonicus</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	13.12	2.58	0.006	36.35	5.03	0.005	931.90	180.17	0.172
kl173	16 March 2013	Rhodophyceae	Ceramiales	<i>Chondria crassicaulis</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	12.14	2.48	0.004	15.77	3.92	0.004	4,277.60	152.07	0.110
kl174	16 March 2013	Phaeophyceae	Laminariales	<i>Undaria pinnatifida</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	6.70	2.11	0.003	n.d.	0.00	0.029	1,352.80	100.01	0.086
kl175	16 March 2013	Phaeophyceae	Laminariales	<i>Undaria pinnatifida</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	5.29	2.10	0.003	11.27	2.96	0.003	1,808.80	102.71	0.084
kl176	16 March 2013	Ulvoephyceae	Cladophorales	<i>Cladophora albida</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	62.13	5.30	0.006	113.19	8.75	0.006	1,573.60	205.12	0.190
kl177	16 March 2013	Rhodophyceae	Gigartinales	<i>Mazzaella japonica</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	n.d.	0.00	0.004	8.24	2.33	0.004	771.82	109.99	0.103

表 1 continued

Sample code	Collection date	Taxonomy		Locality	Note (sample preparation and nature of samples)	^{134}Cs		^{137}Cs		^{40}K					
		Class	Order			Species	Bq kg $^{-1}$	Error	Detect. limit	Bq kg $^{-1}$	Error	Detect. limit	Bq kg $^{-1}$	Error	Detect. limit
k178	16 March 2013	Ulvoephyceae	Ulvales	<i>Ulva pertusa</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	32.05	3.56	0.005	60.48	5.13	0.005	1,362.20	161.87	0.148
k179	16 March 2013	Ulvoephyceae	Ulvales	<i>Ulva pertusa</i>	Hirono, Futaba, Fukushima	Directly dried	26.06	4.60	0.007	58.17	5.74	0.006	1,016.70	201.46	0.192
k180	16 March 2013	Rhodophyceae	Gigartinales	<i>Chondrus giganteus</i>	Hirono, Futaba, Fukushima	Directly dried	8.03	2.00	0.003	13.81	3.09	0.003	537.88	90.53	0.086
k183	16 March 2013	Rhodophyceae	Bangiales	<i>Pyropia yezoensis</i>	Hirono, Futaba, Fukushima	Directly dried	n.d.	0.00	0.005	11.26	2.88	0.004	759.90	146.33	0.139
k184	16 March 2013	Ulvoephyceae	Ulvales	<i>Ulva prolifera</i>	Hirono, Futaba, Fukushima	Directly dried	78.64	6.22	0.008	139.62	8.75	0.007	828.08	230.72	0.224
k185	16 March 2013	Phaeophyceae	Ectocarpales s.l.	<i>Petalonia fascia</i>	Hirono, Futaba, Fukushima	Directly dried	n.d.	0.00	0.005	21.69	3.26	0.004	1,394.70	138.48	0.125
k186	16 March 2013	Rhodophyceae	Gigartinales	<i>Neodilsea longissima</i>	Hirono, Futaba, Fukushima	Directly dried	7.08	2.59	0.003	14.36	3.25	0.003	1,756.70	113.02	0.096
k187	16 March 2013	Rhodophyceae	Gigartinales	<i>Gloiopeltis furcata</i>	Hirono, Futaba, Fukushima	Directly dried	14.63	2.89	0.005	18.17	3.36	0.005	437.27	148.11	0.145
k188	16 March 2013	Rhodophyceae	Gigartinales	<i>Gloiopeltis furcata</i>	Hirono, Futaba, Fukushima	Directly dried	9.04	2.42	0.005	24.57	3.71	0.005	542.12	143.03	0.138
k189	16 March 2013	Phaeophyceae	Ralfsiales	<i>Anatipus japonicus</i>	Hirono, Futaba, Fukushima	Directly dried	22.10	2.30	0.003	36.36	3.02	0.003	1,113.90	1017.40	0.910
k190	16 March 2013	Rhodophyceae	Ceramiales	<i>Chondria crassicaulis</i>	Hirono, Futaba, Fukushima	Directly dried	29.82	2.84	0.003	49.95	4.25	0.003	3,051.80	126.98	0.097
k191	16 March 2013	Phaeophyceae	Laminariales	<i>Undaria pinnatifida</i>	Hirono, Futaba, Fukushima	Directly dried	n.d.	0.00	0.003	11.93	2.67	0.002	1,313.60	89.82	0.077

Values of detection limit in Bq kg $^{-1}$. n.d. means not detectable (below the detection limit). Error means overall error estimated by the analyzing software from systematic errors in the system together with the standard deviation of the counting

表 2 いわき明星大学において測定した ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs の測定結果

Sample code	Collection date	Taxonomy		Locality	Note (sample preparation and nature of samples)	¹³⁴ Cs		¹³⁷ Cs			
		Class	Order			Species	Bq kg ⁻¹	Error	Detect. limit	Bq kg ⁻¹	Error
IMU001	2 May 2011	Phaeophyceae	Dictyotales		Frozen	5,200	138	156	9,430	179	133
IMU002	2 May 2011	Phaeophyceae	Fucales	Shioyazaki, Iwaki, Fukushima	Frozen	1,210	25.2	25.8	1,980	31.5	19.9
IMU003	6 May 2011	Phaeophyceae	Laminariales	Shioyazaki, Iwaki, Fukushima	Frozen	3,910	116	144	6,020	138	108
IMU004	6 May 2011	Phaeophyceae	Laminariales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Frozen	3,670	96.5	107	5,980	119	89.2
IMU005	6 May 2011	Rhodophyceae	Gigartinales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Frozen	2,920	123	159	4,390	146	144
IMU006	9 July 2011	Phaeophyceae	Dictyotales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Frozen	556	72.1	167	1,130	88.2	148
IMU007	9 July 2011	Phaeophyceae	Ectocarpales s.l.	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Frozen	720	163	446	1,390	189	434
IMU008	9 July 2011	Phaeophyceae	Ectocarpales s.l.	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Frozen	590	53.4	98.5	1,080	68.3	101
IMU009	9 July 2011	Phaeophyceae	Desmarestiales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Frozen	154	7.70	11.3	255	9.98	11.5
IMU010	9 July 2011	Phaeophyceae	Laminariales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Frozen	676	16.0	21.0	1,240	21.1	17.5
IMU011	9 July 2011	Rhodophyceae	Gigartinales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Frozen	288	64.1	174	333	63.7	164
IMU012	9 July 2011	Rhodophyceae	Gigartinales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Frozen	569	50.0	102	1,030	58.8	81.1
IMU013	9 July 2011	Rhodophyceae	Gigartinales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Frozen	174	13.2	23.3	339	17.4	22.9
IMU014	9 July 2011	Rhodophyceae	Rhodymeniales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Frozen	733	43.8	70.2	1,190	53.1	64.5
IMU015	14 October 2011	Phaeophyceae	Fucales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Frozen	267	62.3	172	470	66.2	147
IMU016	4 July 2012	Phaeophyceae	Ralfsiales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	54.2	6.30	13.8	87.8	7.52	13.7
IMU017	4 July 2012	Phaeophyceae	Dictyotales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	113	8.20	14.8	150	9.31	14.7
IMU018	4 July 2012	Phaeophyceae	Ectocarpales s.l.	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	128	10.4	20.7	213	12.2	18.5
IMU019	4 July 2012	Phaeophyceae	Ectocarpales s.l.	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	n.d.	0	51.0	56.3	15.8	45.7
IMU020	4 July 2012	Phaeophyceae	Ectocarpales s.l.	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	27.3	8.31	24.4	38.7	9.62	27.0
IMU021	4 July 2012	Phaeophyceae	Fucales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	15.5	3.80	10.6	30.0	4.20	9.20
IMU022	4 July 2012	Phaeophyceae	Fucales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	17.7	3.75	10.3	37.4	4.75	11.1
IMU023	4 July 2012	Phaeophyceae	Fucales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	14.3	2.81	7.59	31.3	3.60	8.00
IMU024	4 July 2012	Phaeophyceae	Laminariales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	n.d.	0	10.8	23.0	4.25	11.2
IMU025	4 July 2012	Phaeophyceae	Laminariales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	n.d.	0	10.8	23.7	3.92	9.39
IMU026	4 July 2012	Phaeophyceae	Laminariales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	14.8	3.23	8.69	19.0	3.67	9.52
IMU027	4 July 2012	Ulvophyceae	Ulvaes	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	15.3	3.76	10.5	23.7	4.32	11.0
IMU028	4 July 2012	Ulvophyceae	Cladophorales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	17.1	3.99	11.0	26.5	4.93	12.7
IMU029	4 July 2012	Ulvophyceae	Codiates	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	n.d.	0	48.0	109	18.3	4.50
IMU030	4 July 2012	Ulvophyceae	Bryopsidales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	72.4	8.32	19.0	86.7	8.96	19.5
IMU031	4 July 2012	Rhodophyceae	Corallinales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	36.2	3.56	7.29	63.9	4.63	7.87
IMU032	4 July 2012	Rhodophyceae	Corallinales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	14.7	3.53	9.82	22.1	3.83	9.45
IMU033	4 July 2012	Rhodophyceae	Gigartinales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	38.9	6.04	14.9	54.2	6.64	14.7
IMU034	4 July 2012	Rhodophyceae	Gigartinales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	23.2	4.07	10.3	40.6	4.87	10.4
IMU035	4 July 2012	Rhodophyceae	Gigartinales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	27.9	35.9	8.22	47.0	4.54	9.15
IMU036	4 July 2012	Rhodophyceae	Ceramiales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	69.0	7.69	16.4	105	8.81	15.4
IMU037	4 July 2012	Rhodophyceae	Ceramiales	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	129	7.29	11.3	239	9.59	9.84

表 2 continued

Sample code	Collection date	Taxonomy		Locality	Note (sample preparation and nature of samples)	^{134}Cs		^{137}Cs				
		Class	Order			Species	Bq kg^{-1}	Error	Detect. limit	Bq kg^{-1}	Error	Detect. limit
IMU038	10 December 2012	Phaeophyceae	Fucales	<i>Sargassum horneri</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	16.3	4.69	13.6	0	16.0	
IMU039	10 December 2012	Phaeophyceae	Fucales	<i>Sargassum siliquastrum</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	60.5	7.04	16.2	118	8.37	13.1
IMU040	10 December 2012	Phaeophyceae	Laminariales	<i>Saccharina japonica</i>	Nagasaki, Iwaki, Fukushima	Directly dried	26.2	5.23	13.8	47.5	6.22	13.9

Values of detection limit in Bq kg^{-1} . n.d. means not detectable (below the detection limit). Error means overall error estimated by the analyzing software from systematic errors in the system together with the standard deviation of the counting