

公益財団法人国土地理協会 第14回学術研究助成

九州沿岸における放射性炭素海洋リザーバー効果の

時空間変化の検討

研究代表者 中西 利典 京都大学大学院理学研究科
附属地球熱学研究施設
共同研究者 奥野 充 福岡大学理学部地球圏科学科
ホン ワン 韓国地質資源研究院
地球化学分析センター

1. はじめに

海洋表層水に由来する放射性炭素 (^{14}C) 年代値は大気起源の値よりも 400 年程度古く、その相違は海洋水の循環や陸水との混合様式などによって地域間で一定ではない。この差異は海洋リザーバー効果と呼ばれ、海水起源の炭素から生成された貝やウニ、有孔虫などの炭酸塩試料の ^{14}C 年代値を暦年に較正する際の障害となる。この問題を解決するために、原子核実験以前の生成年代が判明している海洋試料の ^{14}C 濃度が世界各地において 1300 地点以上で検討されてきた (Calib Marine Reservoir Correction Database)。その中で日本国内での検討数は 23 点 (Konishi et al., 1982 ; Hideshima et al., 2001 ; Shishikura et al., 2007 ; Yoneda et al., 2007) と比較的少なく、それらは北海道や南西諸島に偏在しており、九州沿岸では検討がまだなされていなかった (図 1, Nakanishi et al., 2015)。一方、海洋リザーバー効果は同一地点において常に一定ではなく、過去の海水準や古海洋の循環様式などの影響を受けて変化してきた。こうした効果を把握して過去の海洋試料を正確に暦年較正するた

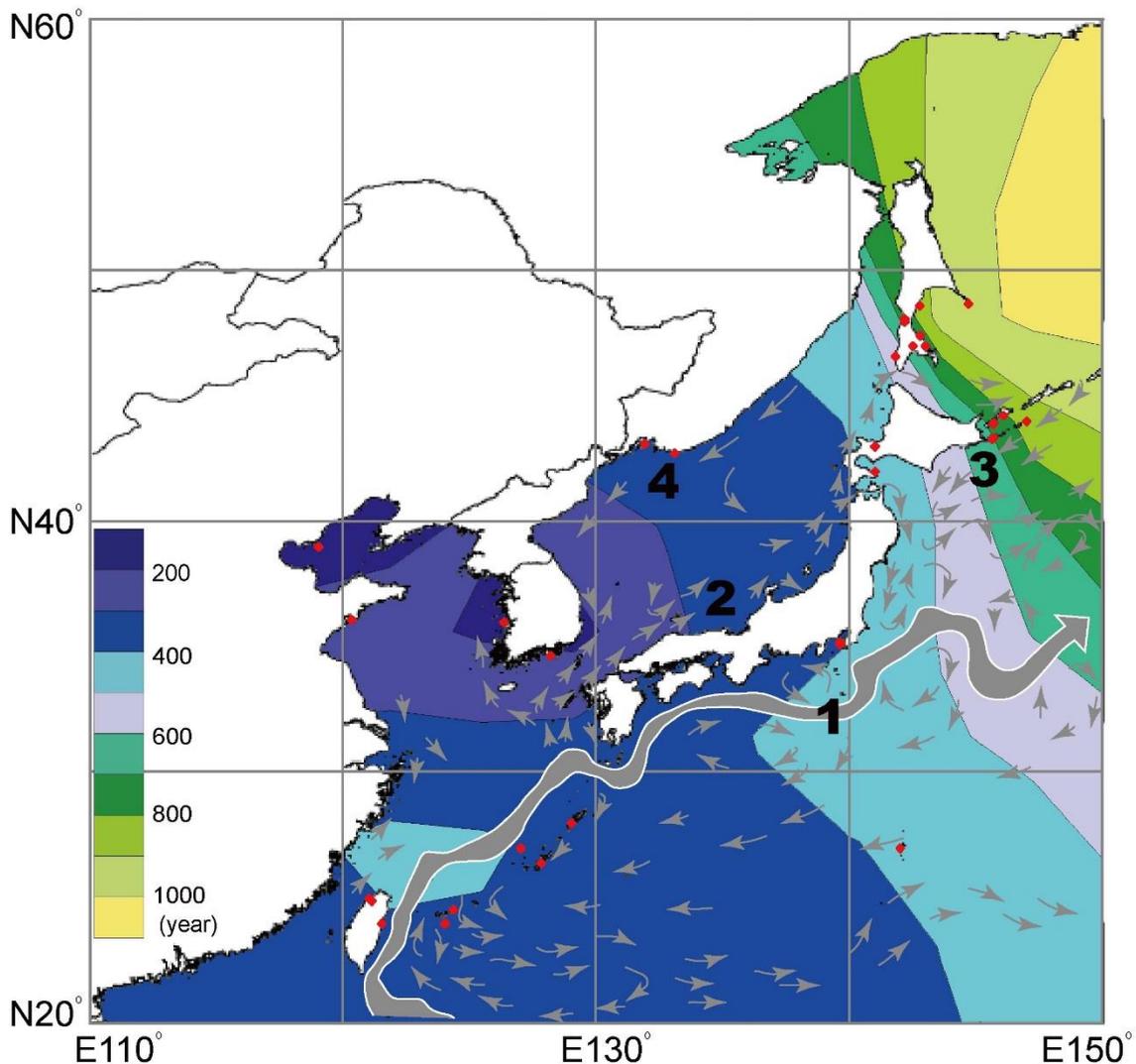


図 1 日本周辺における ^{14}C の海洋リザーバー年代 (R) (Nakanishi et al., 2015)。

既存データは Konishi et al. (1982), Hideshima et al. (2001), Kuzumin et al. (2001, 2007), Southon et al. (2002), Kong et al. (2005), Shishikura et al. (2007), Yoneda et al. (2007) に基づく。等高線はゴールデンソフトウェア社のサーファー 8 を用いてクリギング法で作成された。

(1) 黒潮, (2) 対馬海流, (3) 親潮, (4) リマン海流。

めに、大気起源の植物片と海洋起源の貝殻のセットを九州沿岸のボーリングコア試料の同じ層準から採取して年代測定実験を実施する。この作業を一本のボーリングコアで複数セット実施して、過去の¹⁴Cの海洋リザーバー効果の経年変化を検討する。また、こうした検討を九州の北海岸と東海岸、南海岸において実施して、完新世における気候変動と海洋リザーバー効果との関係を把握することを今回の目的とする。こうした検討は韓国沿岸で既におこなわれており (Nakanishi et al., 2013, 2015, 2017a), 九州沿岸のデータが加われば、東アジアの島孤～半島にかけての完新世を通した海洋リザーバー効果の変動様式が復元できる。その結果、この地域の海洋試料から測定された¹⁴C年代値を正確に暦年較正ができるようになり、地理学や地球科学、考古学、歴史学などの学問分野において貢献できると期待される。そのため、2014–2018年度に博多湾および大分県佐伯市の龍神池、熊本県串間市の本城干潟、鹿児島県志布志の肝属川河口において調査をおこなうと共に、博多湾では活断層調査(下山ほか, 2014)の一環で採取された二本のジオスライサー試料(合計21.3 m)を用いることによって詳細な検討を実施することができた(Nakanishi et al., 2017b)。その結果を中心にして今回の助成研究の内容を報告する。

2. 調査地域およびボーリングコアの掘削方法

九州沿岸で海洋リザーバー効果の時空間変化を検討するために、博多湾、大分県佐伯市の龍神池、熊本県串間市の本城干潟、鹿児島県志布志の肝属川河口において調査をおこなった(表1, 図2)。

博多湾では活断層調査(下山ほか, 2014)の一環として湾内で採取された二本のジオスライサー試料(HKA2-1およびHIUB1-1)を使用した。HKA2-1は湾央部で得られた9.5 m長の試料で、HIUB1-1は湾の北部で得られた11.8 m長の連続試料である。これらは深度20 cm(約11 kg)毎に分取され、袋詰めにして九州大学箱崎キャンパスに保存されていたので、それらを福岡大学七隈キャンパスに運搬した。

龍神池の試料は関西大学工学部による津波堆積物調査の一環として同池の出口付近の中軸部で採取された1.3 m長のピストンコア試料(RJN-D1B)を使用した。

肝属川河口では土木研究所が所有するエンジン打撃式の採土器を用いて0.7~1 m長の二本のボーリングコア試料(KHH-1~2)を採取した。

本城干潟では0.5~1.5 m長の四本のハンドオーガー試料(MKS-1~4)を採取した。

表1 ボーリングコア掘削地点の位置と掘進長.

| Core | Latitude | Longitude | Length (m) |
|----------|-------------|--------------|------------|
| HKA2-1 | 33° 37'25"N | 130° 20'37"E | 9.5 |
| HIUB1-1 | 33° 38'57"N | 130° 22'23"E | 11.8 |
| RJN1-D1B | 32° 56'06"N | 132° 02'28"E | 1.3 |
| KHH-1 | 31° 21'34"N | 131° 00'27"E | 1.0 |
| KHH-2 | 31° 21'38"N | 131° 00'29"E | 0.7 |
| MKS-1 | 31° 25'27"N | 131° 15'02"E | 0.5 |
| MKS-2 | 31° 25'27"N | 131° 15'01"E | 0.5 |
| MKS-3 | 31° 25'23"N | 131° 15'00"E | 1.5 |
| MKS-4 | 31° 25'23"N | 131° 14'59"E | 0.5 |

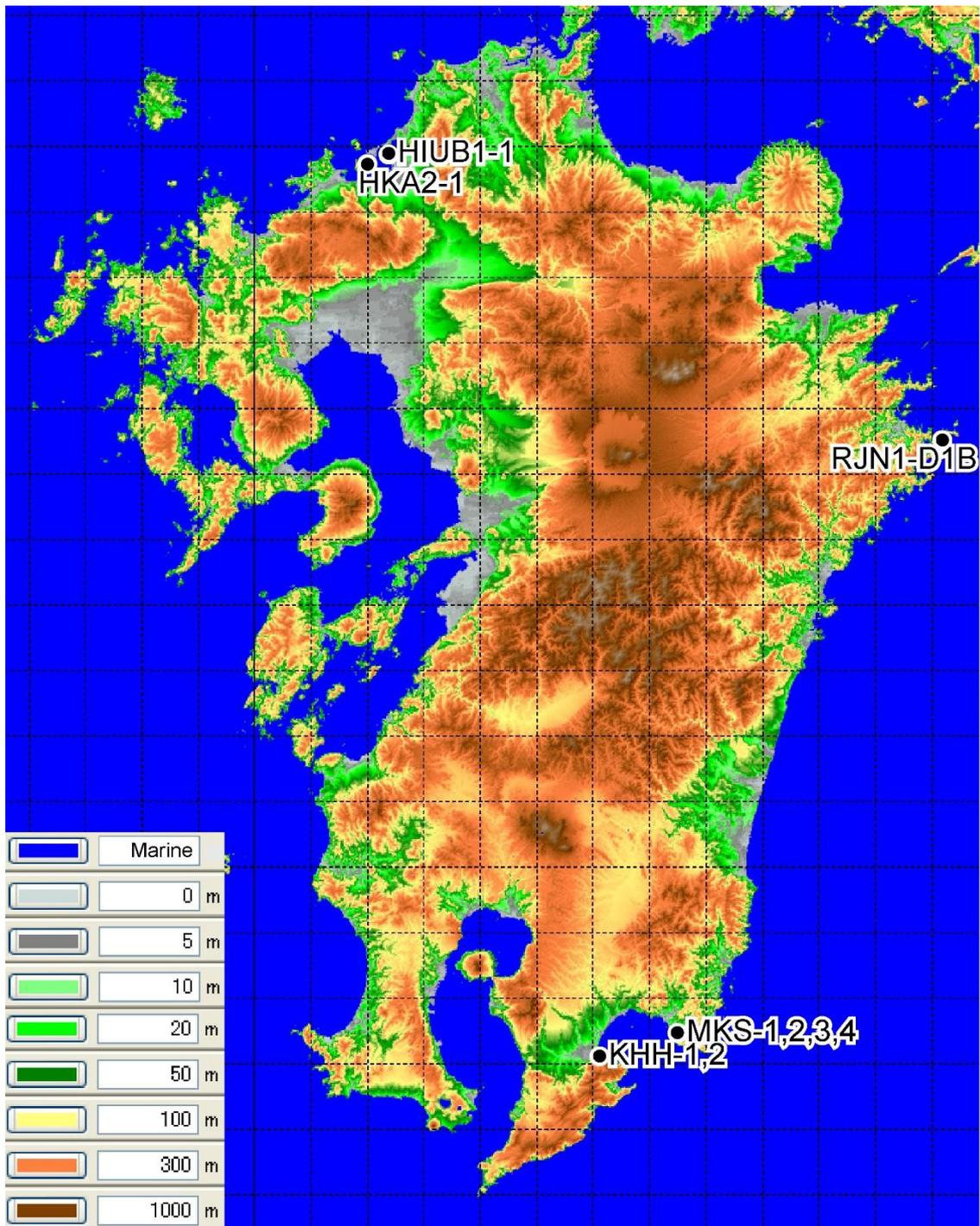


図2 九州の標高断彩図と調査地点.

地図は国土地理院数値地図 50 m メッシュを使用してカシミール 3D で作成された.

3. 分析手法

目開き 2 mm のステンレス製の篩を用いて袋詰めにした博多湾のジオスライサー試料を水洗した. 壊れやすい薄い貝殻や植物片, 合弁の貝殻は種類別に超音波洗浄をして秤量した後, 保存状態のよいものを選んで年代測定に用いた. それら以外の残渣は種類別に分けて秤量した. 水洗前後の試料の重さを量って, 2 mm 大以上の粒子の含有率を計算した.

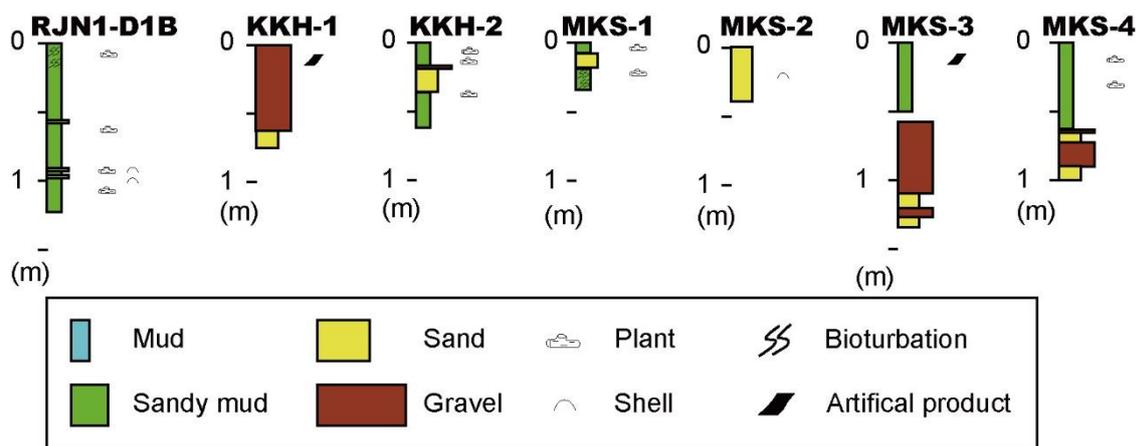


図3 九州東岸から得られたボーリングコア試料の柱状図。

HKA2-1コア試料では植物片と貝殻片の23セット(合計46試料)で加速器質量分析(AMS)法による ^{14}C 年代測定を実施した。貝殻片は深度ごとで特徴的に産出する優先種を選定した。一方、HIUB1-1コア試料では植物片と後述する二種類の貝殻片の12セット(合計36試料)で深度1 m毎に年代測定を実施した。貝殻片は深度ごとで特徴的に産出する優先種の中から、合弁の個体と薄い殻を持つものの二種を選定した。

これらは蒸留水と超音波洗浄機で丁寧に洗った後、植物片と貝殻片に分けて以下の手順で処理した。植物片は一年毎に更新される葉や小枝などの中で保存状態のよいものを優先的に選定した。一規定の塩酸および水酸化ナトリウム水溶液によって酸—アルカリ—酸の順で60℃のヒーター内で溶出分がなくなるまで繰り返し反応させて表面の汚染を除去した。一方、貝殻片は濃度のうすい塩酸と過酸化水素の水溶液によって重量が80%程度になるまで反応させて表面の汚染を除去した。化学処理が終わった試料は韓国地質資源研究院(KIGAM)の元素分析計によって燃焼させて、自動還元処理装置(Hong et al., 2010a)を用いて二酸化炭素を取り出してグラファイトを作製した。アメリカ国立標準技術研究所のシュウ酸OX IIと国際原子力機構の標準試料(C1, C7, C8)、阿蘇4火砕流の埋没材(大分県教育委員会, 2009)も同様に処理してグラファイトを作製した。これらの炭素同位体比をKIGAMのAMSシステム(Hong et al., 2010b)を用いて測定して ^{14}C 年代値を算出した。その際の同位体分別補正にはAMSで測定された $\delta^{13}\text{C}$ 値を用いた。 ^{14}C 年代値を暦年較正する際にはCalib7.10(Stuiver and Reimer, 1993)およびIntCal13(Reimer et al., 2013)を用いた。

龍神池のピストンコア試料(RJN-D1B)および肝属川河口のボーリングコア試料(KKH-1~2)は、アクリル管および塩ビ管に入った状態で福岡大学理学部に持ち帰って半裁された。本城干潟のハンドオーガー試料(MKS-1~4)は採取後表面を削って観察した後、深度10 cm毎にユニパックに詰めて持ち帰った。これらの試料からは海洋リザーバー効果の時間変化を検討するために必要な植物と貝のセットが十分に確保できなかった(図3)ので、上質な試料が得られた博多湾での検討の結果について以下で記述する。

4. 調査結果

博多湾中央部で採取された9.5 m長のHKA2-1コアは上位から、泥層、砂層、礫層、砂層、泥層で構成され、最上位の泥層~礫層の基底までが完新統、深度8.59 m以下が更新統の須崎層(唐木田ほか, 1994)に相当する。一方、同湾の北部で得られた11.8 m長のHIUB1-1コアはすべてが完新統の

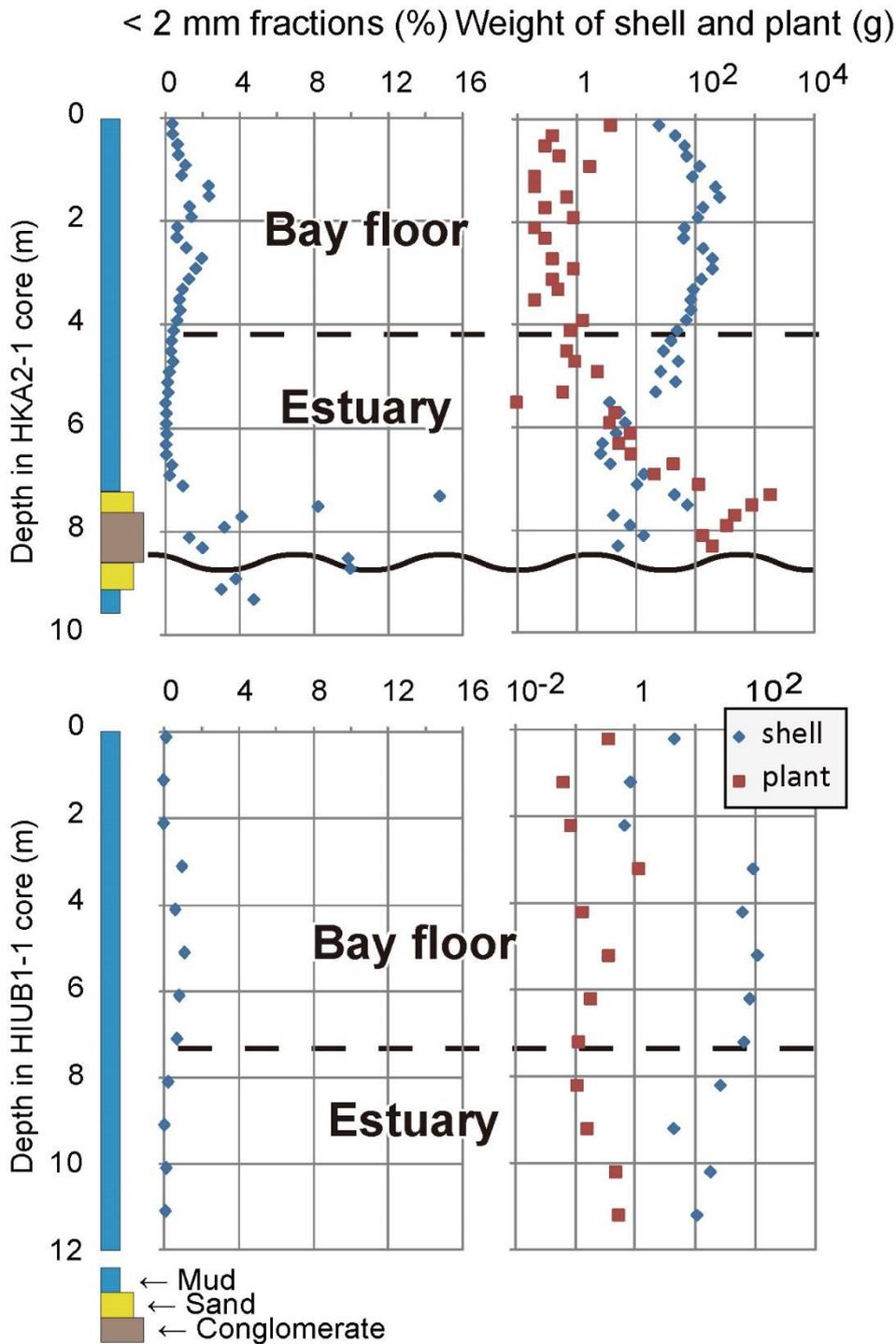
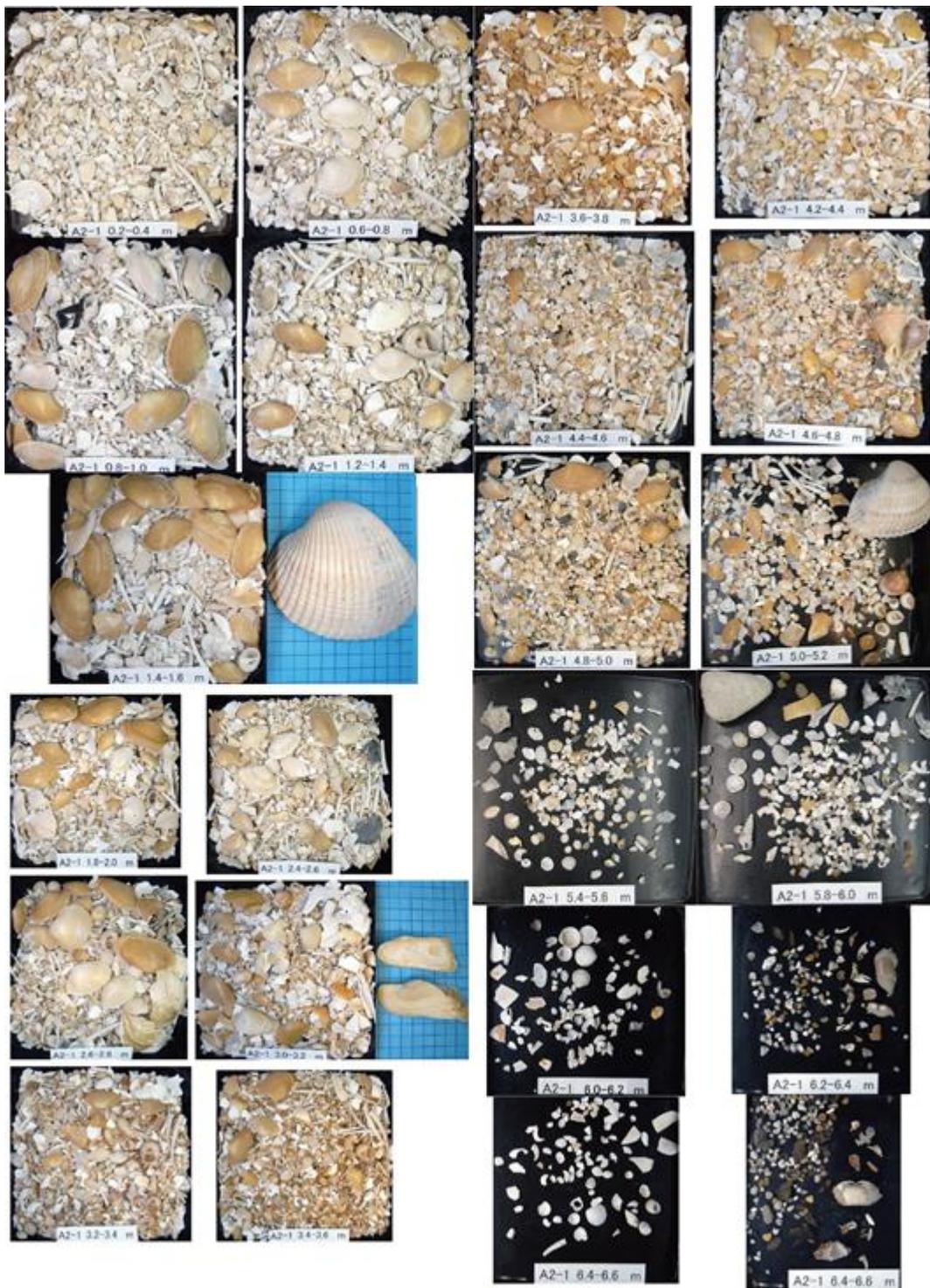
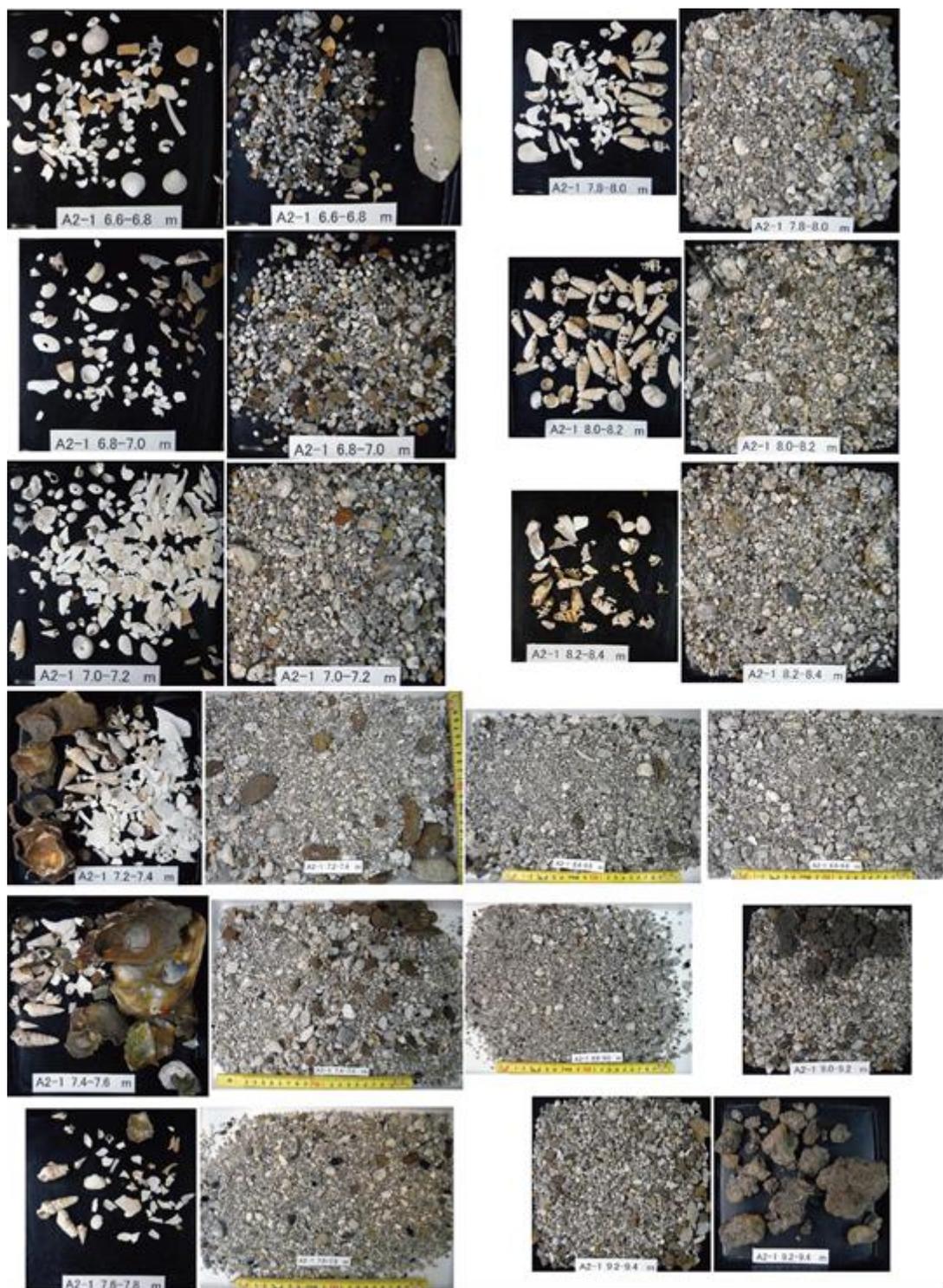


図4 HKA2-1 コアと HIUB1-1 コアの柱状図および 2 mm 以上の粒子の含有率, 植物片と貝片の重量.

泥層で構成される (下山ほか, 2014). これらの柱状図, 2 mm 大以上の粒子の含有率, 植物片と貝片の重量を図4に, 植物片と貝片の写真を図版A~Dに, 各コアの ^{14}C 年代値を付録1に, 堆積曲線を図5にそれぞれ示す. 貝化石の群集組成や植物片の含有度の変化に基づくと, 沖積層は上位の内湾堆積物と下位の海水準の上昇に伴ったエスチュアリー堆積物に二分できる. それらの特徴と堆積環境を解釈した根拠を以下に記載する.



図版A HKA2-1 コアの深度 0.0~6.6 m における 2 mm より大きい粒子.



図版B HKA2-1 コアの深度 6.6~9.4 m における 2 mm より大きい粒子.



図版C HIUB1-1 コアの深度 0.0~5.2 m における植物片と貝殻片.



図版D HIUB1-1 コアの深度 6.0～11.2 m における植物片と貝殻片.

4-1 内湾堆積物

(HKA2-1 コア ; 深度 0.00~4.20 m : HIUB1-1 コア ; 深度 0.00~7.20 m)

記載 : HKA2-1 コアの深度 4.20 m 以浅および HIUB1-1 コアの深度 7.20 m 以浅は貝殻を含む均質な泥層からなる。陸源の植物片の含有度が上位に向かって増加し、一方、イヨスダレ (Born, 1778) やヒメカノコアサリ (Pilsbry, 1904), サルボウ (Tokunaga 1906), トリガイ (Reeve, 1844), チョノハナガイ (Adams & Reeve, 1850) などの貝化石の含有度は中央部付近から多く産出する (図 4)。泥と砂の含有率は 97%以上を示す。現代~7470 BP の ^{14}C 年代値が得られた。鬼界アカホヤ火山灰 (町田・新井, 2003) の特徴と一致する形態と屈折率を持つ火山ガラスの濃集が HKA2-1 コアの深度 3.20 m において報告されている (下山ほか, 2014)。

解釈 : 細粒な泥とイヨスダレやサルボウ, トリガイなどの内湾泥底を主な生息場とする貝化石群集組成, 掘削地点が内湾中であることを鑑みると, 上記の堆積物は内湾底で形成されたと考えられる。上部で認められる植物片の上方増加は, デルタの前進に伴う河川の影響の増大を示唆している。

4-2 エスチュアリー堆積物

(HKA2-1 コア ; 深度 4.20~9.04 m : HIUB1-1 コア ; 深度 7.20~11.80 m)

記載 : HKA2-1 コアの深度 4.20~9.04 m は貝殻混じりの泥層と砂層, 礫層, HIUB1-1 コアの深度 7.20~11.80 m は貝殻混じりの泥層からなる。いずれのコアにおいても上位の内湾堆積物との境界面は不明瞭である。陸源の植物片の含有度が上位に向かって減少し, 反対にイヨスダレやサルボウなどの内湾生貝化石の含有度が増加する傾向がみられる (図 4)。アゲマキガイ (Lamarck, 1818) やホソウミノナ (Crosse, 1862), マガキ (Thunberg, 1793) などの潮間帯指標種は下位で多く認められる (下山ほか, 2014)。4110~8530 BP の ^{14}C 年代値が得られた。

解釈 : イヨスダレやサルボウなどの海生貝化石とアゲマキガイやマガキなどの汽水生種, 陸源の植物片が混在して含まれているので, 海域と陸域双方からの供給により形成されたと考えられる。貝化石の群集組成や植物片の含有度の変化は上位ほど海水の影響が大きいことが示唆される。これは完新世前期の海水準の上昇によるものなので, この堆積物は海進期のエスチュアリーにおいて形成されたと解釈できる。HKA2-1 コアの深度 7.20~8.58 m の砂層と砂礫層には 8310~8530 BP のマガキやアゲマキなどの汽水生の貝化石が含まれており, これ以浅には海水準の上昇に伴って当時の海岸付近で形成されたと考えられる。同層準では潮間帯の貝化石群集組成から潮下帯群集へ上位に向けて変化して, したがって砂礫層の基底面は潮汐ラビーンメント面 (Allen and Posamentier, 1993) に相当すると解釈できる。HIUB1-1 コアの深度 11.00~11.20 m の泥層にも 8240~8350 BP のマガキなどの貝化石が含まれている。これらのほぼ同年代の海岸付近で形成された堆積物はそれらが形成された以降の上下方向の地殻変動を評価する上で貴重な指標になると考えられる。

5. 考察

5-1 HKA2-1 コアの堆積曲線

合計 46 個の ^{14}C 年代値を基にして, 深度/年代の相関図の中での陸生植物と海洋生物遺体の年代値のバラつき様式を層序学的に解釈してそれぞれの堆積曲線を作成した (図 5)。大気起源試料として小枝を, 海洋起源試料として各層準の代表種であるイヨスダレとアゲマキガイ, マガキをそれぞれ選んだ。これらの堆積曲線は下山ほか (2014) が認定した鬼界アカホヤ火山灰の降下層準とその年代 (7165~7303 cal BP ; Smith et al., 2013) と調和的であった。いくつかの年代値は堆積曲線を解釈する上で除外されたので, それらの根拠を以下に記す。

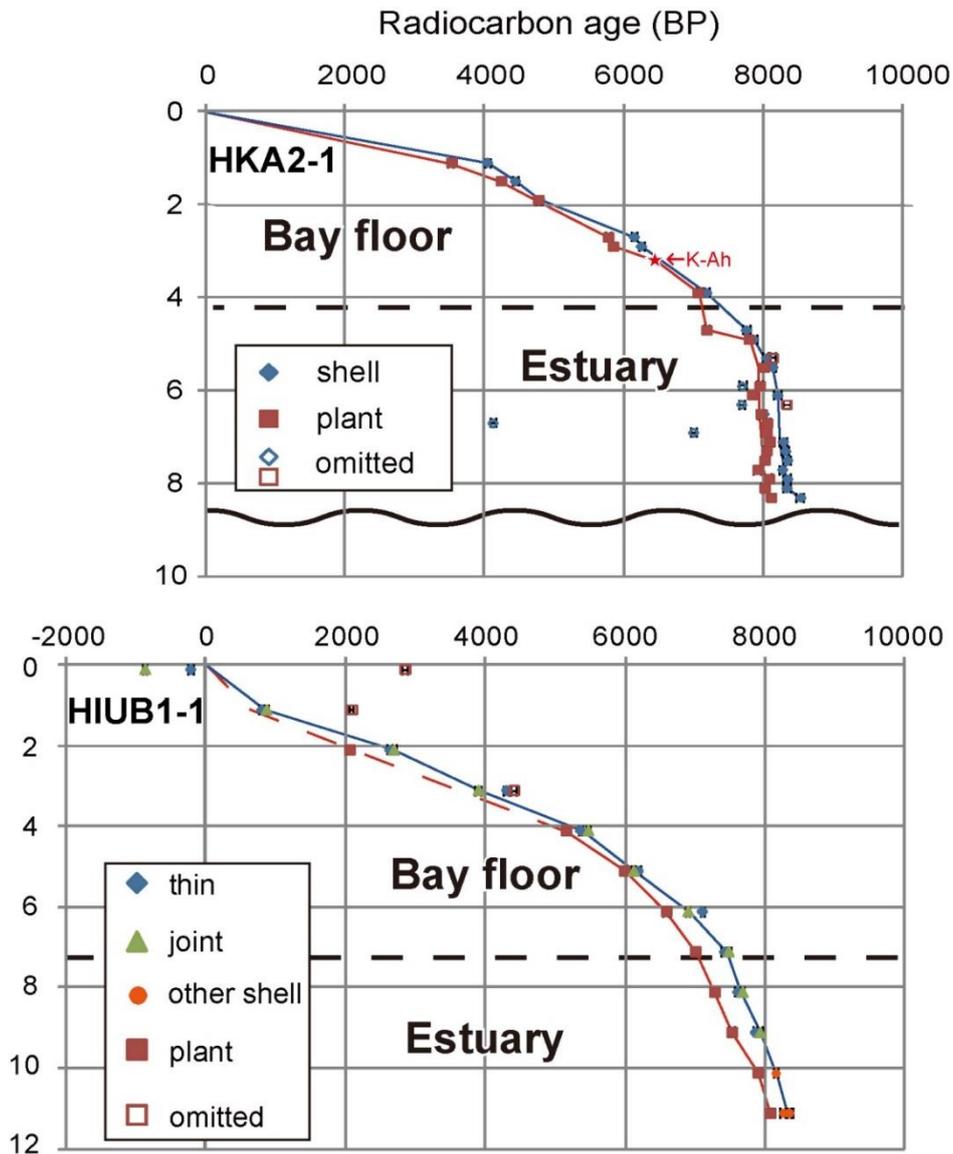


図5 HKA2-1 コアと HIUB1-1 コアの植物片と貝片の堆積曲線.

K-Ah は鬼界アカホヤ火山灰を示す.

深度 5.8~7.0 m の 5 試料のイオスダレから得た年代値は深度 6.0~6.2 m の年代値を除いて 280~4170 年も他の海洋試料の年代値に基づく堆積曲線から若い年代値を示す. これらの年代値は層序的に整合しないので堆積曲線の解釈から除外された. この層準には *Callianassa* spp.による生痕 *Thalassinoides* (市原ほか, 1996) が多く認められ, こうした巣穴を補強するために二枚貝やその破片が用いられたものと考えられる. 一方, 深度 5.2~5.4 m と 6.2~6.4 m の小枝の年代値は他の陸源試料の堆積曲線よりも 200~300 年古い. これらの試料には試料調製や測定データに異常が認められないので, 古い地層から再堆積したものであると考えられる. これらの再堆積の影響は韓国南部の栄山江で得た 120~880 年 (Nakanishi et al., 2013) よりも明らかに小さい. さらに, 貝殻片には再堆積の影響は全く認められなかった. こうした再堆積の影響が軽微な環境は植物片と海洋生物遺体を用いて放射性炭素の海洋リザーバー効果を評価する上で好都合である.

5 - 2 HIUB1-1 コアの堆積曲線

合計 36 個の ^{14}C 年代値を基にして, 陸生植物と海洋生物遺体の年代値のバラつき様式を解釈して二本の堆積曲線を同様に作成した (図5). 大気起源試料として小枝を, 海洋起源試料として各層準の

代表種であるヒメカノコアサリ，チヨノハナガイとホソウミニナ，マガキおよび未分類の貝殻片をそれぞれ選んだ．深度 0.0～3.2 m の 3 試料の小枝から得た年代値は堆積曲線よりも 110～2840 年若い値を示す．一方，同深度で得られた貝殻片の年代値の差異は小さく，食性の違いによって相違が生じていると考えられるので，後で詳しく検討する．

5 - 3 HKA2-1 コアの海洋リザーバー効果

再堆積や生物擾乱の影響を取り除いた 17 セットの植物片と貝殻片の ^{14}C 年代値の差異 (R) は $10 \pm 60 \sim 570 \pm 70$ 年の範囲であった (図 6)．それらの平均値は 280 ± 150 年であり，内湾堆積物では 270 ± 190 年 (n=6)，エスチュアリー堆積物では 290 ± 140 年 (n=11) であった．内湾堆積物の標準偏差が大きいのはエスチュアリー堆積物における 4 mm/yr の堆積速度よりも 7 倍小さな堆積速度の影響かもしれない．こうした傾向は HIUB1-1 コアでも同様に認められる．濾過食の貝化石の R 値はイヨスダレが 270 ± 200 年 (n=10)，アゲマキガイが 280 ± 60 年 (n=5)，マガキが 370 ± 80 年 (n=2) であった．こうした相違は $\delta^{13}\text{C}$ 値との相関が顕著であり，淡水の影響が大きいほど差異は大きくな

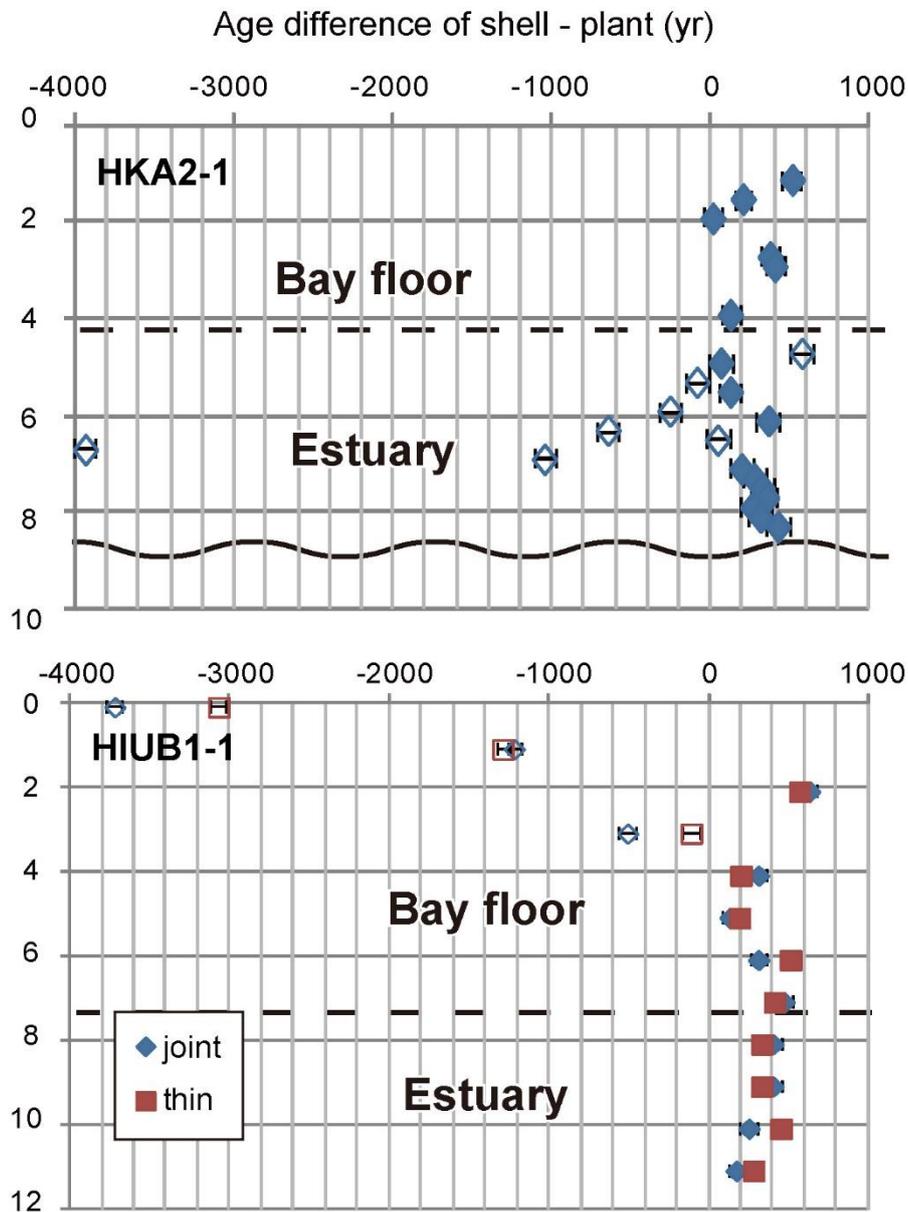


図 6 HKA2-1 コアと HIUB1-1 コアの植物片と貝片の ^{14}C 年代値の差異.

る. こうした関係はパプアニューギニア (Petchey et al., 2012) やデンマーク (Philippsen et al., 2013) においても報告されている.

5 - 4 HIUB1-1 コアの海洋リザーバー効果

再堆積の影響を取り除くと $130 \pm 50 \sim 630 \pm 40$ 年の範囲の植物片と貝殻片の差異が認められた (図 6). それらの平均値は 340 ± 140 年 ($n=18$) であり, 内湾堆積物では 370 ± 170 年 ($n=10$), エスチュアリー堆積物では 300 ± 80 年 ($n=8$) であった. これらの差異は深度 7.0-11.2 m において徐々に大きくなる傾向が認められる. 同様な傾向は韓国西岸及び南岸の海進堆積物でも報告されており, その原因は完新世前期の海水準の上昇に伴う海水の影響の増大によると考えられる (Nakanishi et al., 2013, 2015). 濾過食のヒメカノコアサリの R 値は 380 ± 160 年 ($n=7$), 堆積物食のチヨノハナガイが 360 ± 140 年 ($n=7$), その他の貝が 240 ± 50 年 ($n=4$) であった. 濾過食と堆積物食の二枚貝の間に海洋リザーバー効果の顕著な差異は認められなかった. 同コアの貝から得られた $\delta^{13}\text{C}$ 値は先述した HKA2-1 コアのものよりもバラつきが小さい. このことは博多湾の中央部よりも湾北部の方が海水と陸水の循環の頻度が少ないことを反映していると考えられる.

6. 結論と今後の課題

博多湾の中央部と北部において得られた 35 試料の植物片と 47 試料の貝殻の ^{14}C 年代値によると, 9000 cal BP 以降の海洋リザーバー年代 (R) 値は $60 \pm 140 \sim 800 \pm 150$ 年であり, その平均値は 310 ± 150 ($n=35$) 年であった. これらの韓国西岸および南岸で報告されている 380 ± 190 ($n=48$) 年と調和的であり, 両地域が共に対馬海流の影響にあることと整合する. 一方, 今回は掘削機器の整備不良や調査日数の不足などで九州南部や東部においては十分に検討ができなかった. 今後はこれらの地域においても新たにボーリングコアを得て解析を実施する必要がある.

謝 辞

九州大学理学部の下山正一先生には博多湾のジオスライサー試料およびそれに関連した研究データをご提供して頂きました. 福岡大学大学院理学研究科および同理学部の鮎澤 潤助教および山崎圭二, 山内卓也, 坂口 巧, 井村美智子の各氏には会計管理や野外調査, 試料洗浄を手伝って頂きました. AMS による ^{14}C 年代測定用試料の調整にあたって, 韓国地質資源研究院のパク ギュジュン博士およびリ ジョンゴル研究員にお世話になりました. 土木研究所の稲崎富士上席研究員および品川俊介主任研究員にはエンジン打撃式の採土器を借用させて頂きました. 国立歴史民俗博物館の今村峯雄名誉教授と日田市教育庁文化財保護課の皆様には AMS 年代測定のパックグラウンド試料となる埋没材をご提供して頂きました. 龍神池のピストンコア試料の採取にあたり関西大学工学部の金丸絹代研究員のお世話になりました. この研究を進めるにあたって国土地理協会の研究助成金を使用させて頂きました. 以上の皆様に感謝申し上げます. なお, 本研究助成のお蔭で日本学術振興会科学研究費の補助金基盤研究 (B) 18H01310 が採択されて, 日本周辺の海洋リザーバー効果の時空間変化の検討につながりました.

引用文献

- Allen GP, Posamentier HW (1993) Sequence stratigraphy and facies model of an incised valley fill: the Gironde estuary, France. *Journal of Sedimentary Research* 63(3), 378–391.
- Hideshima S, Matsumoto E, Abe O, Kitagawa H (2001) Northwest Pacific marine reservoir correction estimated from annually banded coral from Ishigaki island, southwest Japan. *Radiocarbon* 43(2A): 473–476.

- Hong W, Park JH, Kim KJ, Woo HJ, Kim JK, Choi HK, Kim GD (2010a) Establishment of chemical preparation methods and development of an automated reduction system for AMS sample preparation at KIGAM. *Radiocarbon* **52**(3):1277-1287.
- Hong W, Park JH, Sung KS, Woo HJ, Kim JK, Choi HW, Kim GD (2010b) A new 1MV AMS facility at KIGAM. *Radiocarbon* **52**(2):243-251.
- 市原季彦・高塚 潔・下山正一 (1996) 生痕層序, 地質学雑誌, **102**, 685-699 .
- 唐木田芳文・富田幸臣・下山正一・千々和一豊(1994) 福岡地域の地質, 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所, 192p.
- Kong GS, Lee CW (2005) The Sea. *Journal of the Korean Society of Oceanography* **10**(2):124-128 (in Korean with English abstract).
- Konishi K, Tanaka T, Sakanoue M (1982) Secular variation of radiocarbon concentration in seawater: Sclerochronological approach. *In Proceedings of the Fourth International Coral Reef Symposium, Manila*, 181-185.
- Kuzmin YV, Burr GS, Jull AJT (2001) Radiocarbon reservoir correction ages in the Peter the Great Gulf, Sea of Japan, and eastern coast of the Kunashir, Southern Kuriles (Northwestern Pacific) *Radiocarbon*, **43**(2), 477-481.
- Kuzmin YV, Burr GS, Gorbunov SV, Rakov VA, Razjigaeva (2007) A tale of two seas: Reservoir age correction values (R , ΔR) for the Sakhalin Island (Sea of Japan and Okhotsk Sea) *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, **259**(1), 460-462.
- 町田 洋・新井 房夫(2003) 新編 火山灰アトラス[日本列島とその周辺], 東京大学出版会, 336p.
- Nakanishi T, Hong W, Sung KS, Lim J (2013) Radiocarbon reservoir effect from shell and plant pair in Holocene sediments around the Yeongsan River in Korea *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, **294**, 444-451. doi:10.1016/j.nimb.2012.09.025
- Nakanishi T, Hong W, Sung KS, Sung KH, Nakashima R (2015) Offsets in radiocarbon ages between plants and shells from same horizons of coastal sediments in Korea *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, **361**, 670-679.
- Nakanishi T, Hong W, Sung KS, Nakashima R, Nahm WH, Lim J, Katsuki K (2017a) Offset in radiocarbon age between plant and shell pairs in Holocene sediment around the Mae-ho Lagoon on the eastern coast of Korea. *Quaternary International*, doi: 10.1016/j.quaint.2016.10.036.
- Nakanishi T, Hong W, Shimoyama S, Sato S, Park G, Lee JG (2017b) Radiocarbon age offset between shell and plant pairs in the Holocene sediments under the Hakata Bay, western Japan. *Radiocarbon*, **59** (2), 423-434, doi:10.1017/RDC.2016.124.
- Nummedal D, Riley GW, Templet PL (1993) High-resolution sequence architecture: a chronostratigraphic model based on equilibrium profile studies *In* Posamentier HW, Summerhayes CP, Haq BU, Allen GP (Eds.), *Sequence stratigraphy and facies associations*, vol. 18, International Association of Sedimentologists Special Publication, 55-68.
- 大分県教育委員会 (2009) 日田市鈴連町の阿蘇4火砕流と埋没樹木群調査. 大分県教育委員会調査報告書, 175, 127p.
- Petchey F, Ulm S, David B, McNiven IJ, Asmussen B, Tomkins H, Richards T, Rowe C, Leavesley M, Mandui H, Staniscic J (2012) ^{14}C marine reservoir variability in herbivores and deposit-feeding gastropods from an open coastline, Papua New Guinea *Radiocarbon* **54**(3-4), 967-978.
- Philippsen B, Olsen J, Lewis JP, Rasmussen P, Ryves DB, Knudsen KL (2013) Mid- to late-Holocene reservoir-

- age variability and isotope-based palaeoenvironmental reconstruction in the Limfjord, Denmark *The Holocene*, **23**, 1017-1027.
- Reimer PJ, Bard E, Bayliss A, Beck JW, Blackwell PG, Bronk Ramsey C, Buck CE, Cheng H, Edwards RL, Friedrich M, Grootes PM, Guilderson TP, Haflidason H, Hajdas I, Hatté C, Heaton TJ, Hoffmann DL, Hogg AG, Hughen KA, Kaiser KF, Kromer B, Manning SW, Niu M, Reimer RW, Richards DA, Scott EM, Southon JR, Staff RA, Turney CSM, van der Plicht J (2013) IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50,000 years cal BP *Radiocarbon* **55**(4) , 1869-1887.
- 下山正一・磯 望・黒木貴一・岡村 眞 (2014) 博多湾内および周辺海域の活断層の活動性及び活動履歴調査, 警固断層帯 (南東部) における重点的な調査観測, 平成 23-25 年度成果報告, 文部科学省研究開発局, 241-287.
- Shishikura M, Echigo T, Kaneda H (2007) Marine reservoir correction for the Pacific coast of central Japan using ^{14}C ages of marine mollusks uplifted during historical earthquakes *Quaternary Research*, **67**(2), 286-291. doi:10.1016/j.yqres.2006.09.003
- Smith VC, Staff RA, Blockley SPE, Bronk Ramsey C, Nakagawa T, Mark DF, Takemura K, Danhara T, Suigetsu 2006 Project Members (2013) Identification and correlation of visible tephras in the Lake Suigetsu SG06 sedimentary archive, Japan: chronostratigraphic markers for synchronizing of east Asian/west Pacific palaeoclimatic records across the last 150 ka *Quaternary Science Review*, **67**, 121-137.
- Southon J, Kashgarian M, Fontugne M, Metivier B, Yim WW-S (2002) Marine reservoir corrections for the Indian Ocean and southeast Asia *Radiocarbon*, **44**(1), 167-180.
- Stuiver M, Reimer PJ (1993) Extended ^{14}C data base and revised Calib 3.0 ^{14}C age calibration program *Radiocarbon*, **35**(1), 215-230. Updated to CALIB 7.10. <http://calib.org/calib/>
- Yoneda M, Uno H, Shibata Y, Suzuki R, Kumamoto Y, Yoshida K, Sasaki T, Suzuki A, Kawahata H (2007) Radiocarbon marine reservoir ages in the western Pacific estimated by pre-bomb molluscan shells *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, **259**, 432-437.

付録1 HKA2-1 コアと HIUB1-1 コアから得た ¹⁴C 年代値.

プラス (+) 印とマイナス (-) 印が付いた試料には、再堆積と上位からの混入の影響がそれぞれ示唆される。

| Core | Depth | | Material | $\delta^{13}\text{C}$ | | Conventional ¹⁴ C age | | Sample code KGM-Otg- |
|---------|------------|---------------|--------------------------------|-----------------------|--------|----------------------------------|----------|-------------------------|
| | Top (m) | Bottom (m) | | (‰) | (+/-‰) | (BP) | (+/- yr) | |
| HKA2-1 | 1.0 | 1.2 | Twig | -25.4 | 1.5 | 3520 | 40 | 150689 |
| HKA2-1 | 1.4 | 1.6 | Twig | -22.2 | 1.7 | 4230 | 40 | 150690 |
| HKA2-1 | 1.8 | 2.0 | Twig | -25.5 | 2.1 | 4770 | 40 | 150691 |
| HKA2-1 | 2.6 | 2.8 | Twig | -26.9 | 1.0 | 5770 | 40 | 150692 |
| HKA2-1 | 2.8 | 3.0 | Twig | -25.7 | 3.4 | 5840 | 40 | 150693 |
| HKA2-1 | 3.8 | 4.0 | Twig | -26.0 | 1.7 | 7060 | 40 | 150694 |
| HKA2-1 | 4.6 | 4.8 | Twig, - | -30.1 | 0.7 | 7180 | 50 | 150695 |
| HKA2-1 | 4.8 | 5.0 | Twig | -26.1 | 0.5 | 7790 | 50 | 150696 |
| HKA2-1 | 5.2 | 5.4 | Twig, + | -22.7 | 1.3 | 8130 | 50 | 150697 |
| HKA2-1 | 5.4 | 5.6 | Twig | -27.5 | 1.6 | 8010 | 50 | 150698 |
| HKA2-1 | 5.8 | 6.0 | Twig | -26.6 | 1.0 | 7950 | 50 | 150699 |
| HKA2-1 | 6.0 | 6.2 | Twig | -26.1 | 0.8 | 7840 | 50 | 150700 |
| HKA2-1 | 6.2 | 6.4 | Seed, + | -25.9 | 3.4 | 8330 | 50 | 150701 |
| HKA2-1 | 6.4 | 6.6 | Twig | -31.1 | 1.2 | 7960 | 50 | 150702 |
| HKA2-1 | 6.6 | 6.8 | Twig | -29.6 | 2.3 | 8050 | 50 | 150703 |
| HKA2-1 | 6.8 | 7.0 | Twig | -27.6 | 2.1 | 8040 | 50 | 150704 |
| HKA2-1 | 7.0 | 7.2 | Twig | -32.3 | 2.5 | 8090 | 50 | 150705 |
| HKA2-1 | 7.2 | 7.4 | Twig | -32.7 | 9.0 | 8040 | 50 | 150706 |
| HKA2-1 | 7.4 | 7.6 | Twig | -32.3 | 7.1 | 8020 | 50 | 150707 |
| HKA2-1 | 7.6 | 7.8 | Twig | -32.5 | 6.0 | 7920 | 50 | 150708 |
| HKA2-1 | 7.8 | 8.0 | Twig | -26.7 | 4.0 | 8080 | 50 | 150709 |
| HKA2-1 | 8.0 | 8.2 | Twig | -33.1 | 5.1 | 8020 | 50 | 150710 |
| HKA2-1 | 8.2 | 8.4 | Twig | -26.8 | 4.1 | 8110 | 50 | 150711 |
| HKA2-1 | 1.0 | 1.2 | <i>Paphia undulata</i> | 2.3 | 2.6 | 4030 | 40 | 150732 |
| HKA2-1 | 1.4 | 1.6 | <i>Paphia undulata</i> | 3.4 | 2.0 | 4430 | 40 | 150733 |
| HKA2-1 | 1.8 | 2.0 | <i>Paphia undulata</i> | 2.0 | 2.5 | 4780 | 40 | 150734 |
| HKA2-1 | 2.6 | 2.8 | <i>Paphia undulata</i> | 3.3 | 2.5 | 6140 | 40 | 150735 |
| HKA2-1 | 2.8 | 3.0 | <i>Paphia undulata</i> | -0.3 | 2.3 | 6240 | 40 | 150736 |
| HKA2-1 | 3.8 | 4.0 | <i>Paphia undulata</i> | 5.3 | 2.4 | 7180 | 40 | 150737 |
| HKA2-1 | 4.6 | 4.8 | <i>Paphia undulata</i> | 0.9 | 1.1 | 7750 | 50 | 150738 |
| HKA2-1 | 4.8 | 5.0 | <i>Paphia undulata</i> | 3.0 | 1.1 | 7850 | 50 | 150739 |
| HKA2-1 | 5.2 | 5.4 | <i>Paphia undulata</i> | -0.1 | 1.1 | 8040 | 50 | 150740 |
| HKA2-1 | 5.4 | 5.6 | <i>Paphia undulata</i> | 1.3 | 1.8 | 8130 | 50 | 150741 |
| HKA2-1 | 5.8 | 6.0 | <i>Paphia undulate, -</i> | -3.0 | 4.3 | 7690 | 50 | 150742 |
| HKA2-1 | 6.0 | 6.2 | <i>Paphia undulate</i> | -0.9 | 0.7 | 8200 | 50 | 150743 |
| HKA2-1 | 6.2 | 6.4 | <i>Paphia undulate, -</i> | -1.0 | 1.0 | 7680 | 40 | 150744 |
| HKA2-1 | 6.4 | 6.6 | <i>Paphia undulate, -</i> | -1.4 | 0.4 | 8000 | 50 | 150745 |
| HKA2-1 | 6.6 | 6.8 | <i>Paphia undulate, -</i> | -1.9 | 1.7 | 4110 | 40 | 150746 |
| HKA2-1 | 6.8 | 7.0 | <i>Paphia undulate, -</i> | -4.2 | 1.1 | 6990 | 40 | 150747 |
| HKA2-1 | 7.0 | 7.2 | <i>Sinonovacula constricta</i> | -8.0 | 1.5 | 8280 | 50 | 150748 |
| HKA2-1 | 7.2 | 7.4 | <i>Sinonovacula constricta</i> | -4.7 | 0.9 | 8310 | 50 | 150749 |
| HKA2-1 | 7.4 | 7.6 | <i>Sinonovacula constricta</i> | -7.6 | 1.0 | 8340 | 50 | 150750 |
| HKA2-1 | 7.6 | 7.8 | <i>Sinonovacula constricta</i> | -5.8 | 0.5 | 8270 | 50 | 150751 |
| HKA2-1 | 7.8 | 8.0 | <i>Sinonovacula constricta</i> | -8.3 | 1.4 | 8340 | 50 | 150752 |
| HKA2-1 | 8.0 | 8.2 | <i>Crassostrea gigas</i> | -5.9 | 1.4 | 8330 | 50 | 150753 |
| HKA2-1 | 8.2 | 8.4 | <i>Crassostrea gigas</i> | -3.1 | 1.3 | 8530 | 50 | 150754 |
| HIUB1-1 | 0.0 | 0.2 | Twig, + | -28.1 | 3.6 | 2840 | 40 | 150712 |
| HIUB1-1 | 1.0 | 1.2 | Twig, + | -22.1 | 2.6 | 2080 | 30 | 150713 |
| HIUB1-1 | 2.0 | 2.2 | Twig | -30.4 | 2.9 | 2050 | 30 | 150714 |
| HIUB1-1 | 3.0 | 3.2 | Twig, + | -29.6 | 1.5 | 4400 | 40 | 150715 |
| HIUB1-1 | 4.0 | 4.2 | Twig | -31.0 | 1.2 | 5150 | 40 | 150716 |
| HIUB1-1 | 5.0 | 5.2 | Twig | -30.7 | 1.6 | 5980 | 40 | 150717 |
| HIUB1-1 | 6.0 | 6.2 | Twig | -30.4 | 1.6 | 6580 | 40 | 150718 |
| HIUB1-1 | 7.0 | 7.2 | Twig | -30.2 | 2.2 | 7000 | 40 | 150719 |
| HIUB1-1 | 8.0 | 8.2 | Twig | -35.0 | 4.0 | 7270 | 50 | 150720 |
| HIUB1-1 | 9.0 | 9.2 | Twig | -28.2 | 1.1 | 7520 | 50 | 150721 |
| HIUB1-1 | 10.0 | 10.2 | Twig | -29.7 | 3.0 | 7890 | 50 | 150722 |
| HIUB1-1 | 11.0 | 11.2 | Twig | -24.5 | 1.2 | 8070 | 40 | 150723 |
| HIUB1-1 | 0.0 | 0.2 | Jointed <i>Veremolpa micra</i> | -2.6 | 0.6 | -880 | 30 | 150755 |
| HIUB1-1 | 0.0 | 0.2 | <i>Raetellops pulchellus</i> | 0.1 | 0.8 | -230 | 30 | 150756 |
| HIUB1-1 | 1.0 | 1.2 | Jointed <i>Veremolpa micra</i> | -0.4 | 1.2 | 860 | 30 | 150757 |
| HIUB1-1 | 1.0 | 1.2 | <i>Raetellops pulchellus</i> | -2.1 | 0.5 | 790 | 30 | 150758 |
| HIUB1-1 | 2.0 | 2.2 | Jointed <i>Veremolpa micra</i> | 0.8 | 1.5 | 2680 | 30 | 150759 |
| HIUB1-1 | 2.0 | 2.2 | <i>Raetellops pulchellus</i> | -0.6 | 1.9 | 2620 | 40 | 150760 |
| HIUB1-1 | 3.0 | 3.2 | Jointed <i>Veremolpa micra</i> | 0.3 | 2.7 | 3890 | 40 | 150761 |
| HIUB1-1 | 3.0 | 3.2 | <i>Raetellops pulchellus</i> | 2.0 | 1.8 | 4290 | 40 | 150762 |
| HIUB1-1 | 4.0 | 4.2 | Jointed <i>Veremolpa micra</i> | -0.6 | 1.1 | 5460 | 30 | 150763 |
| HIUB1-1 | 4.0 | 4.2 | <i>Raetellops pulchellus</i> | -3.1 | 1.2 | 5350 | 30 | 150764 |
| HIUB1-1 | 5.0 | 5.2 | Jointed <i>Veremolpa micra</i> | -0.8 | 1.2 | 6110 | 30 | 150765 |
| HIUB1-1 | 5.0 | 5.2 | <i>Raetellops pulchellus</i> | -2.6 | 1.0 | 6170 | 30 | 150766 |
| HIUB1-1 | 6.0 | 6.2 | Jointed <i>Veremolpa micra</i> | -1.4 | 1.1 | 6890 | 30 | 150767 |
| HIUB1-1 | 6.0 | 6.2 | <i>Raetellops pulchellus</i> | -2.1 | 0.4 | 7090 | 30 | 150768 |
| HIUB1-1 | 7.0 | 7.2 | Jointed <i>Veremolpa micra</i> | -2.7 | 1.0 | 7470 | 30 | 150769 |
| HIUB1-1 | 7.0 | 7.2 | <i>Raetellops pulchellus</i> | -0.3 | 1.2 | 7410 | 30 | 150770 |
| HIUB1-1 | 8.0 | 8.1 | Jointed <i>Veremolpa micra</i> | 0.3 | 0.9 | 7670 | 30 | 150771 |
| HIUB1-1 | 8.0 | 8.2 | <i>Raetellops pulchellus</i> | -2.1 | 0.4 | 7600 | 30 | 150772 |
| HIUB1-1 | 9.0 | 9.2 | Jointed <i>Veremolpa micra</i> | -0.4 | 1.1 | 7920 | 30 | 150773 |
| HIUB1-1 | 9.0 | 9.2 | <i>Raetellops pulchellus</i> | -1.1 | 1.3 | 7850 | 30 | 150774 |
| HIUB1-1 | 10.0 | 10.2 | Unclassified shell | 0.1 | 0.7 | 8140 | 30 | 150775 |
| HIUB1-1 | 11.0 | 11.2 | <i>Sinonovacula constricta</i> | -2.2 | 1.0 | 8340 | 30 | 150776 |
| HIUB1-1 | 11.0 | 11.2 | <i>Crassostrea gigas</i> | -4.0 | 1.1 | 8240 | 30 | 150777 |
| HIUB1-1 | 11.0 | 11.2 | <i>Batillaria cumingii</i> | -4.4 | 0.6 | 8350 | 30 | 150778 |