

安全研究成果報告（案）

安全研究成果報告

S/NRA/R Research Report

地震の活動履歴評価手法に関する研究

Research on Assessment Methods for Earthquake Activity Records

内田 淳一 松浦 旅人 佐津川 貴子 佐藤 勇輝

UCHIDA Jun'ichi, MATSU'URA Tabito, SATSUKAWA Takako, and SATO Yuki

地震・津波研究部門

Division of Research for Earthquake and Tsunami

原子力規制庁

長官官房技術基盤グループ

Regulatory Standard and Research Department,

Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

令和2年 月

Month 2020

本報告は、原子力規制庁長官官房技術基盤グループが行った安全研究プロジェクトの活動内容・成果をとりまとめたものです。

なお、本報告の内容を規制基準、評価ガイド等として審査や検査に活用する場合には、別途原子力規制委員会の判断が行われることとなります。

本報告の内容に関するご質問は、下記にお問い合わせください。

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ 地震・津波研究部門
〒106-8450 東京都港区六本木 1-9-9 六本木ファーストビル
電 話：03-5114-2226
ファックス：03-5114-2236

地震の活動履歴評価手法に関する研究

原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ
地震・津波研究部門

内田 淳一 松浦 旅人 佐津川 貴子 佐藤 勇輝

要 旨

「敷地内及び敷地周辺の地質・地質構造調査に係る審査ガイド」（以下「審査ガイド」という。）では「将来活動する可能性のある断層等」が定義されている。また、「その認定に当たって、後期更新世（約 12～13 万年前）の地形面又は地層が欠如する等、後期更新世以降の活動性が明確に判断できない場合には、中期更新世以降（約 40 万年前以降）まで遡って地形、地質・地質構造及び応力場等を総合的に検討した上で活動性を評価すること」とされており、断層の活動性評価に係る知見を継続的に蓄積していくことが重要である。

さらに、確率論的地震ハザード評価及び確率論的津波ハザード評価では、地震履歴（活動時期、活動間隔等）の情報が評価結果に大きく影響するため、リスク評価の活用に向けて、これらの情報に係る技術的根拠を明確にすることが重要である。

以上を踏まえ、平成 29 年度から令和元年度にわたって、「活断層に起因する内陸地殻内地震の履歴に関する評価手法の整備」及び「プレート間地震の履歴に関する評価手法の整備」に取り組んだ。なお、浅海域における古地震履歴評価手法の整備（下記(1)①）及びイベント堆積物を用いた古地震履歴評価手法の整備（下記(1)②）は国立大学法人東京大学新領域創成科学研究科に委託し、微化石分析等を実施した。また、宇宙線生成核種による隆起年代評価手法の整備（下記(2)②）は国立大学法人東京大学大気海洋研究所に委託し、年代測定等を実施した。

成果の要約を以下に記す。

(1) 活断層に起因する内陸地殻内地震の履歴に関する評価手法の整備

①浅海域における古地震履歴評価手法の整備

断層を挟んだ 2 点間のコアで完新統（完新世の地層）を対象に微化石分析等を実施した結果、複数の層準を対比することができた。2 点間の層厚の差異は地震時の隆起・沈降の傾向を反映していると考えることができ、完新統のコアを対象にした断層変位指標の検出に微化石分析等が有用であることを示した。

②イベント堆積物を用いた古地震履歴評価手法の整備

断層近傍のコアで完新統を対象に帯磁率測定及び微化石分析を実施した。その結果、帯磁率変化のピーク対比と花粉群集変化を組み合わせることで、近傍コアとの対比面が多く得られ、イベント堆積物の対比に本手法が有用であることを示した。

③火山灰層序学的年代評価手法の整備

深海底堆積物（ちきゅう C9001C コア）及び陸域堆積物に含まれる火山灰（テフラ）の対比を検討した。その結果、中期更新世以降のテフラ年代を高精度に決定するとともに、深海底堆積物中のテフラと陸成堆積物中のテフラとを対比することができ、断層変位指標である海成段丘の年代評価に信頼性の高いテフラ年代を活用できる見通しを得た。

(2) プレート間地震の履歴に関する評価手法の整備

①放射性炭素年代測定による隆起年代評価手法の検討

離水海岸地形の高度分布及びその年代を検討した。その結果、既知の地震による離水海岸地形の妥当な年代値を得ることができた。さらに、酸処理濃度及び年代測定試料の対象の違いが放射性炭素年代測定の結果に与える影響を把握できた。

②宇宙線生成核種による隆起年代評価手法の整備の検討

宇宙線生成核種を用いることで離水海岸地形の年代を推定し、隆起年代評価に本手法が適用できる可能性を示した。また、数千年前に形成された比較的若い隆起海岸地形においても、測定の際のバックグラウンドを低減することによって、宇宙線照射により生成した核種を検出できることが分かった。

内陸地殻内地震及びプレート間地震の履歴評価に向けて、コア間の対比精度を高めること及び信頼性の高いテフラ年代を得ることができた。それにより、断層変位指標の検出及びイベント堆積物の対比が可能となり、また海成段丘の信頼性の高い年代評価を実施できる見通しを得た。離水海岸地形の年代評価については、従来手法による結果のばらつきを把握でき、先駆的な宇宙線生成核種を適用できる見通しを得た。

Research on Evaluation Methods for Assessment of Earthquake Activity Records

UCHIDA Jun'ichi, MATSU'URA Tabito, SATSUKAWA Takako, and SATO yuki
Division of Research for Earthquake and Tsunami,
Regulatory Standard and Research Department,
Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

Abstract

The Review Guide for Geology and Geological Structure Investigation at and around the Site defines capable faults. The Guide requires that “Identification of capable faults, if a clear judgment cannot be made about the activities after the Late Pleistocene to identify suitable ground due to missing geographical surfaces or geological formations from the Late Pleistocene, activities must be evaluated by comprehensive analysis of the terrain, geology, geological structure, stress field, and so forth by dating back to a period after the Middle Pleistocene (about 400,000 years ago)”. Therefore, continuous accumulation of knowledge for assessment of fault activity is important.

In Probabilistic Seismic Hazard Assessment (PSHA) and Probabilistic Tsunami Hazard Assessment (PTHA) for risk assessment, earthquake activity records (active age and interval of activity) greatly contribute to assessment results. Therefore, it is important to clear technical sources of their records for practical use of risk assessment.

In this project, five sub-projects were conducted during fiscal years 2017 to 2019.

The sub-projects ((1)-1) and (1)-2)) were implemented by Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo through the NRA commissioned project, micro-paleontological analyses were implemented. The sub-project ((2)-2)) was implemented by Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo through the NRA commissioned project to perform dating analyses.

(1) Development of an evaluation method for clarifying of records on inland crustal earthquake due to active fault

1) Development of a method for palaeo-earthquake records in a shallow sea area

We analyzed micro-paleontology etc. in two Holocene core samples positioned on both sides of the fault. We can recognize that the differences of thickness of the deposits from two core samples suggest the trend on coseismic uplift or subsidence. Therefore, micro-paleontological analyses etc. are useful for detection of earthquake activity records in Holocene core samples.

2) Development of an evaluation method for paleo-earthquake records using event deposits

We analyzed micro-paleontology etc. in the marine core near the fault. This analysis indicates the capability to gain many correlative horizons to neighboring cores through the peak correlation of magnetic susceptibility changes and pollen assemblage's changes, even if the horizon.

3) Development of an evaluation method for tephrostratigraphic age

We investigated the correlation between volcanic ash (tephra) in deep submarine deposits (Chikyu C9001C core) and one in land. We decided the eruption ages of tephra with high accuracy, and correlated tephra in deep submarine deposits with one in land. Therefore we acquired perspective that the ages can be applied to age assessment of marine terrace as index of fault displacement.

(2) Development of an evaluation method for inter plate earthquake records

1) Development of a method for uplift age assessment using ^{14}C dating

We investigated elevation distribution and uplift age of the emerged shoreline topography. Through the investigation, we acquired a reasonable uplift age of known earthquakes. Furthermore, we recognized the effects of acid treatment density and difference of measurement sample type on age assessment.

2) Development of an evaluation method for uplift age using terrestrial cosmogenic nuclides dating

This sub-project estimated age of emerged benches using terrestrial cosmogenic nuclide (TCN), suggests that TCN dating can be applied to the emerged benches. Furthermore, the result also indicated that TCN dating applies to young (several thousand years) emerged benches by the measurements reduced in the background.

For estimate of the records of inland crustal earthquake and inter plate earthquake, accuracy improvement of correlation among the core samples and acquiring reliable tephra ages were performed. They enable to detect index of fault displacement, to correlate the event deposits, to evaluate age of marine terrace. For age assessment of the emerged shoreline topography, application of pioneering TCN dating are important in future other than usual methods.

目次

1.	序論.....	1
1.1	背景.....	1
1.2	目的.....	2
1.3	全体行程.....	3
2.	本論.....	4
2.1	活断層に起因する内陸地殻内地震の履歴に関する評価手法の整備.....	4
2.1.1	浅海域における古地震履歴評価手法の整備.....	4
2.1.2	イベント堆積物を用いた古地震履歴評価手法の整備.....	11
2.1.3	火山灰層序学的年代評価手法の整備.....	21
2.2	プレート間地震の履歴に関する評価手法の整備.....	29
2.2.1	放射性炭素年代測定による隆起年代評価手法の検討.....	29
2.2.2	宇宙線生成核種による隆起年代評価手法の整備.....	36
3.	結論.....	43
3.1	成果の要点.....	43
3.2	目的の達成状況及び成果の活用等.....	44
	参考文献一覧.....	46
	執筆者一覧.....	49

目 次

図 1.1	地震の活動履歴評価手法に関する研究の全体行程	3
図 2.1	栗島 1 コア及び栗島 2 コアの採取位置	6
図 2.2	栗島 1 コア及び栗島 2 コアの帯磁率による対比	7
図 2.3	栗島 1 コアの花粉分析結果	8
図 2.4	栗島 2 コアの花粉分析結果	9
図 2.5	栗島 1 コア及び栗島 2 コアの花粉分析による対比	10
図 2.6	別府コアの採取位置及び活断層の分布	14
図 2.7	別府コア及び既報 BP09-4 コアの帯磁率による対比	15
図 2.8	別府コアの珪藻花粉分析結果（上部）	16
図 2.9	別府コアの珪藻花粉分析結果（中部）	17
図 2.10	別府コアの珪藻花粉分析結果（下部）	18
図 2.11	別府コア及び BP09-6 コアの花粉分析による対比	19
図 2.12	帯磁率及び花粉分析に基づく別府コアと最深部コア BP09-4 コアとの対比	20
図 2.13	下北沖 C9001C 孔の位置	24
図 2.14	ちきゅう C9001C 孔の層相、微化石年代層序、テフラ層序及び海洋酸素同位体層序	25
図 2.15	テフラに含まれる角閃石粒子の化学組成	26
図 2.16	角閃石粒子の SEM 画像及び単一粒子内の累帯構造	27
図 2.17	ちきゅう C9001C 孔の深海底堆積物のテフラ層序、微化石年代層序及び年代モデル	28
図 2.18	三浦半島城ヶ島の UAV レーザー測量による高度段彩図及び地形面区分	32
図 2.19	三浦半島荒崎の UAV レーザー測量による高度段彩図及び地形面区分	33
図 2.20	三浦半島城ヶ島に分布する離水生物遺骸群集から得られた放射性炭素年代	34
図 2.21	三浦半島荒崎に分布する離水生物遺骸群集から得られた放射性炭素年代	34
図 2.22	足摺岬松尾の UAV レーザー測量による高度段彩図及び地形面区分	35
図 2.23	足摺岬松尾に分布する離水生物遺骸群集から得られた放射性炭素年代	35
図 2.24	石英中における宇宙線生成核種の生成	40
図 2.25	試料採取地点及びボーリングコアの様子	41
図 2.26	MCMC 法の概要	42
図 2.27	^{10}Be 濃集量の深度プロファイル	42

用語の定義

放射性炭素年代測定 (Radiocarbon Dating)

生物遺体中の放射性炭素 ^{14}C 濃度が、生物の死後、時間とともに減少することを利用した年代測定法。測定試料は木材、炭、貝殻、泥炭、骨等で、その中の ^{14}C 濃度は放射能計測あるいは加速器を用いた質量分析器で測定する。 ^{14}C の半減期は 5,568 年により計算し、結果が比較できるよう統一されている。このようにして算出した ^{14}C 年代は共通の誤差による暦の年代からの差異がある。大気圏内核実験による放射線の影響をあまり受けていない 1950 年を基準にそれより何年前であることを示すため、測定値の年数に B.P. (Before Present 又は Before Physics) をつけて、例えば 3,680 \pm 600 yr B.P. と表記する。

海洋酸素同位体ステージ (Marine Isotopic Stage; MIS)

酸素の同位体比による過去の気温に基づいたステージ区分。深海底等のボーリングコア中の有孔虫の殻に含まれる ^{16}O 及び ^{18}O の同位体比を連続的に測定して温度変化を解析し、氷期・間氷期をステージ (MIS) として区分する。MIS は氷期に偶数、間氷期に奇数を付けて整理されるため、現在の後氷期は MIS 1、それより古い氷期、間氷期のサイクルには、MIS 2、3、4、5・・・と記載される。氷期又は間氷期中にみられる亜間氷期・亜氷期については、sub stage の階層に位置づけて a、b・・・の記号を付ける。例：MIS 5b は間氷期である MIS 5 中の亜氷期。

宇宙線生成核種 (Terrestrial Cosmogenic Nuclides:TCN)

宇宙線 (一次宇宙線) が大気に飛び込んだ際に生じる中性子、ミュオン等の高エネルギー粒子が地球表層の岩石中に照射される際の相互作用によって生成する核種をいう。岩石中の宇宙線生成核種の蓄積量を測定することにより、岩石が地表に露出して宇宙線に被曝される環境に置かれてからの時間、換言すれば岩石が地表に露出する原因となった地震、気候変動等の地質学的イベントの年代を定量的に評価することが可能となる。

1. 序論

1.1 背景

「敷地内及び敷地周辺の地質・地質構造調査に係る審査ガイド」（以下「審査ガイド」という。）では「将来活動する可能性のある断層等」が定義されている。また、「その認定に当たって、後期更新世（約 12～13 万年前）の地形面又は地層が欠如する等、後期更新世以降の活動性が明確に判断できない場合には、中期更新世以降（約 40 万年前以降）まで遡って地形、地質・地質構造及び応力場等を総合的に検討した上で活動性を評価すること」とされており、断層の活動性評価に係る知見を継続的に蓄積していくことが重要である。

さらに、確率論的地震ハザード評価及び確率論的津波ハザード評価では、地震履歴（活動時期、活動間隔等）の情報が評価結果に大きく影響するため、リスク評価の活用に向けて、これらの情報に係る技術的根拠を明確にすることが重要である。

内陸地殻内地震のうち、地表に明瞭な痕跡を残す活断層について、陸域では基本的にトレンチ調査により活動性が評価されているが、海域ではトレンチ調査が実施できない。そのため、統計的に推定された活動間隔が用いられることが多く、評価結果に与える不確かさの幅が大きくなることが課題である。また、地表に明瞭な痕跡を残さない活断層については、広域的に変形した地形面及び地層の形成年代を火山灰を用いて推定し、それを基に活動性を評価する方法があるが、火山灰の年代誤差が活動性評価の結果に大きく影響することが課題である。この課題は、地表に明瞭な痕跡を残さない活断層の認定にも直結している。断層の活動性に関し、「審査ガイド」では、「起震断層及び活動区間や震源領域の活動性は、既存文献の調査、変動地形学的調査、地質調査、地球物理学的調査の結果に基づく平均変位速度、変位量及び活動間隔等により推定されていることを確認する。」とされている。中期更新世以降の断層の活動性に関し、「審査ガイド」では、「中期更新世以降の断層等の評価には、この時代の地形面や地層の変位・変形に注目することが一般的である。中でも酸素同位体ステージ 7、9、11 の温暖期（高海水準期）に対応づけられる段丘面や地層の利用が有効である。」とされている。さらに、「審査ガイド」では、断層等の評価方法として「火山灰を利用する方法」及び「微化石分析（花粉、珪藻、有孔虫、貝形虫等）や化学分析から古環境変遷を明らかにし、上記の温暖期（高海水準期）と対応づける方法」が挙げられており、これらの方法を具体化し、断層の活動性評価手法として整備していくことが重要である。

一方、プレート間地震の履歴については、これまで主として歴史地震の情報が利用されてきた。しかしながら、平成 23 年東北地方太平洋沖地震から得られた教訓を踏まえると、活動間隔が長い地震も対象にした先史時代における地震履歴の情報を整理し、その扱い方を検討することが重要である。

1.2 目的

以上を踏まえ、平成 29 年度から令和元年度にわたって、以下の研究課題 ((1)及び(2))に取り組んだ。

(1) 活断層に起因する内陸地殻内地震の履歴に関する評価手法の整備 (平成 29 年度～令和元年度)

①浅海域における古地震履歴評価手法の整備

確率論的地震ハザード評価及び確率論的津波ハザード評価に必要な、海域における内陸地殻内地震の活動履歴を評価する方法の一つとして、断層を挟んだ 2 点間の柱状採泥調査によって断層変位指標を識別し、海域活断層の活動履歴を調査する方法が挙げられる。そこで、このような試料に対し完新統 (完新世の地層) を対象に帯磁率測定及び微化石分析を実施し、断層変位指標としての適用性を検討する。

②イベント堆積物を用いた古地震履歴評価手法の整備

確率論的地震ハザード評価及び確率論的津波ハザード評価に必要な、海域における内陸地殻内地震の活動履歴を評価する方法の一つとして、イベント堆積物を識別し、間接的に周辺の活断層の活動履歴を調査する方法が挙げられる。そこで、断層近傍で実施された柱状採泥調査によって得られた試料に対し完新統を対象に帯磁率測定及び微化石分析を実施し、イベント堆積物を対比する上でのこれらの分析の適用性を検討する。

③火山灰層序学的年代評価手法の整備

震源断層の評価にとって、活断層の活動性に関わる年代評価は極めて重要な役割をもつ。特に地表に明瞭な痕跡を残さない活断層については、広域的に変形した地形面及び地層の形成年代を火山灰を用いて推定し、それを基に活動性を評価する方法があるが、火山灰の年代誤差が活動性評価の結果に大きく影響することが課題である。そこで、新規基準に対応する海洋酸素同位体ステージ (Marine Isotopic Stage : 以下「MIS」という。) 11 以降 (最近約 40 万年間) の火山灰層序学的年代評価手法を整備するため、深海底堆積物 (ちきゅう C9001C コア) 及び陸域堆積物に含まれる火山灰 (テフラ) の対比を検討する。

(2) プレート間地震の履歴に関する評価手法の整備 (平成 29 年度～令和元年度)

①放射性炭素年代測定による隆起年代評価手法の整備

プレート間地震又は沿岸域の内陸地殻内地震の活動履歴を評価する方法として、沿岸隆起に起因する離水海岸地形及び離水生物群集の放射性炭素年代測定に基づいた方法が挙げられる。そこで、隆起年代を評価する際の結果のばらつき (酸処理濃度及び測定試料の対象の違い) を把握するため、すでに隆起したことが明らかな地域において離水海岸地形を認定し、高度分布及びその地形面が形成された年代を検討する。

②宇宙線生成核種による隆起年代評価手法の整備

プレート間地震又は沿岸域の内陸地殻内地震の活動履歴を評価する方法として有効な離水生物群集が化石として保存されにくい地域においては、放射性炭素年代測定が利用できない。そこで、宇宙線生成核種を用いて離水海岸地形の年代を評価する上での不確実性の要因を分析するとともに本手法による評価上の留意点を整理し、隆起年代評価への適用可能性を検討する。

1.3 全体行程

本研究は平成 29 年度から令和元年度にかけて実施したものであり、得られた成果を本報告書にまとめる。なお、浅海域における古地震履歴評価手法の整備及びイベント堆積物を用いた古地震履歴評価手法の整備は国立大学法人東京大学新領域創成科学研究科、宇宙線生成核種による隆起年代評価手法の整備は国立大学法人東京大学大気海洋研究所に委託し、実施したものである。全体行程を図 1.1 に示す。

実施内容	平成29年度	平成30年度	平成31年度 令和元年度
(1)活断層に起因する内陸地殻内地震の履歴に関する評価手法の整備			
①浅海域における古地震履歴評価手法の整備			
②イベント堆積物を用いた古地震履歴評価手法の整備			
③火山灰層序学的年代評価手法の整備			
(2)プレート間地震の履歴に関する評価手法の整備			
①放射性炭素年代測定による隆起年代評価手法の整備			
②宇宙線生成核種による隆起年代評価手法の整備			

図 1.1 地震の活動履歴評価手法に関する研究の全体行程

Fig. 1.1 Schedule of research on Evaluation Methods for Assessment of Earthquake Activity Records.

2. 本論

2.1 活断層に起因する内陸地殻内地震の履歴に関する評価手法の整備

2.1.1 浅海域における古地震履歴評価手法の整備

(1) はじめに

内陸地殻内地震のうち、地表に明瞭な痕跡を残す活断層について、陸域では基本的にトレンチ調査により詳しい活動履歴が評価されているが、海域ではトレンチ調査が実施できない。そのため、地球物理学的調査により上部更新統（後期更新世の地層）の変位又は変形の有無から「将来活動する可能性のある断層等」に該当することが明らかな場合であっても、陸域ほど詳しい活動履歴を評価することは困難である。したがって、海域の内陸地殻内地震を対象にした確率論的地震ハザード評価及び確率論的津波ハザード評価では統計的に推定された活動間隔が用いられることが多く、評価結果に与える不確実さの幅が大きくなることが課題である。

海域における内陸地殻内地震の活動履歴を評価する方法の一つに、断層を挟んだ2点間のボーリング調査等により、特徴的な堆積物の変位及び厚さの変化を明らかにし、断層の活動した時期を推定する方法が挙げられる。近年実施されている海域の活断層調査においても、例えば日奈久断層帯海域部において、地球物理学的調査及び柱状採泥調査により、完新世において少なくとも4回、それ以前に1回の断層活動があったことが確認されている¹。しかし、堆積物が均質である場合（外洋に面する陸棚域において典型的）及び年代が既知の火山灰に乏しい場合には、断層による変位を認識しづらくなる。そのため、断層による変位を認識するための別の指標（以下「断層変位指標」という。）が必要になる。

そこで、本研究では断層を挟んだ2点間の柱状採泥調査によって得られた試料に対し完新統（完新世の地層）を対象に帯磁率測定及び微化石分析を実施し、断層変位指標としてのこれら手法の適用性を検討した。

なお、本研究は国立大学法人東京大学新領域創成科学研究科に委託し、実施したものである。

(2) 研究対象物質及び分析手法の検討

研究対象とした海域は1964年新潟地震震源域であり、これに対応する隆起帯は1990年前後にすでに認識されている²。本海域から採取された2本のコア（以下「栗島1コア」及び「栗島2コア」という。）を用いて、コア解析を実施した（図2.1）。栗島1コアはコア長が約630cmであり、コア深度430cm付近にシルト質粘土と砂質粘土の岩相境界が認められる。栗島2コアはコア長が約480cmであり、栗島1コアで認められるシルト質粘土と砂質粘土の岩相境界はコア深度280cm付近に認められる。これらのコアは、半割後にラップで覆われコア箱に入れられた後、室温で保管されている状態であった。乾燥による多少の

ひび割れ、表面の酸化等は認められたものの、大きな変質は認められず、測定及び分析に大きな影響を与えるものではないと判断した。

コア解析は、地球物理学的測定として帯磁率測定を 2cm 間隔で実施し、また、古環境学的分析として花粉分析及び珪藻分析を 10cm 間隔で実施した。

(3) 帯磁率測定及び花粉化石分析の結果

帯磁率測定及び花粉化石分析の結果から、栗島 1 コア及び栗島 2 コアの対比を試みた。

帯磁率によるコア間の対比を試みた結果を図 2.2 に示す。まず対比される層準としては岩相境界が挙げられる。栗島 1 コアでの岩相境界より下位となる M-c 区間では岩相境界のやや下位で帯磁率の上昇が認められ、下位に向かうにしたがって減少していく傾向がある。一方、栗島 2 コアの M-c'区間では岩相境界を境に下位では帯磁率の上昇が認められるのは栗島 1 コアと同様であるが、下位に向かって帯磁率が減少していく栗島 1 コアと異なり、栗島 2 コアでは下位に向かうにしたがって上昇し、値のばらつきも目立つようになる。M-c 区間及び M-c'区間の上限は岩相境界に一致させている。次に、栗島 1 コアの M-a 区間と栗島 2 コアの M-a'区間では、両コアともに帯磁率 8~9 前後で安定した値幅で相関がよいものと考えられ、栗島 1 コアにおける M-a から M-b に移行する帯磁率の低下と、栗島 2 コアにおける M-a'から M-b'に帯磁率がやや低下する層準は対比可能と考えられる。M-a 区間及び M-a' 区間の下限は、安定した値幅から下がり始める層準に設定した。さらに、栗島 1 コアの M-b 区間と栗島 2 コアの M-b'及び M-b''区間については、帯磁率が低くなっているという特徴は類似するが、栗島 2 コアの M-b''区間で認められるような帯磁率の上昇は栗島 1 コアでは認められない。そのため、M-b と M-b'及び M-b''区間との対応は良くない。

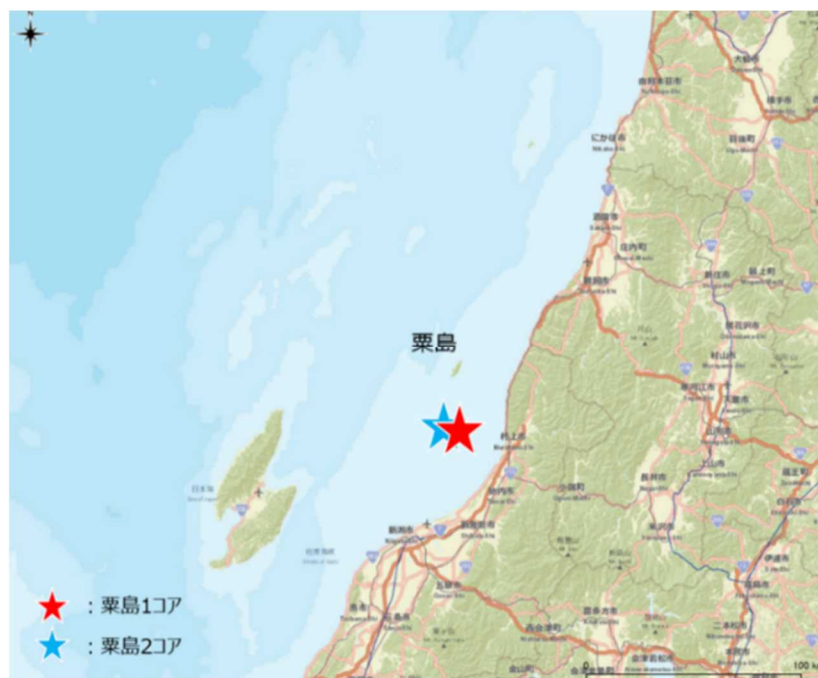
両コアの花粉化石分析結果を図 2.3 及び図 2.4 に、それらに基づくコア間の対比の結果を図 2.5 に示す。図 2.5 に示すとおり、それぞれのコアで認められた花粉化石のイベントを対比することができる。両コア間における花粉化石のイベントの層序関係はおおむね整合的であるが、モミ・ツガ・トウヒ属の減少のイベントについては、栗島 1 コアでは岩相境界の直下に認められるのに対し、栗島 2 コアではコナラ属アカガシ亜属の減少イベントとマツ属の増加イベントの間に認められる結果となった。花粉化石のイベントは認定する境界の判断が難しいところも多いため、イベントの境界認定が誤っている可能性や、対比に用いるのに適していない種であるという可能性もある。今回の分析では試料採取間隔が両コアでほぼ同じであるため、図 2.5 の縦軸は堆積物の層厚とおおむね比例していることから、便宜的に層厚としてみなすことができる。その考え方に基づき、対比された花粉化石のイベント間の層厚に着目すると、最上位のスギ属の増加イベントより上位の層厚は両コアでおおむね同程度であるが、それよりも下位のカバノキ属の減少からスギ属の増加イベントまでの層厚は、栗島 1 コアより栗島 2 コアのほうが薄くなっている。その中でもコ

ナラ属アカガシ亜属の増加イベントからコナラ属アカガシ亜属の減少イベントまでの層厚は両コアで同程度であり、その前後の区間の層厚が変化していることが分かる。このような層厚の変化は、地震時の隆起・沈降の傾向を反映していると考えられる。

なお、原因は不明であるが、珪藻化石については全ての試料から産出が見られなかった。

(4) まとめ

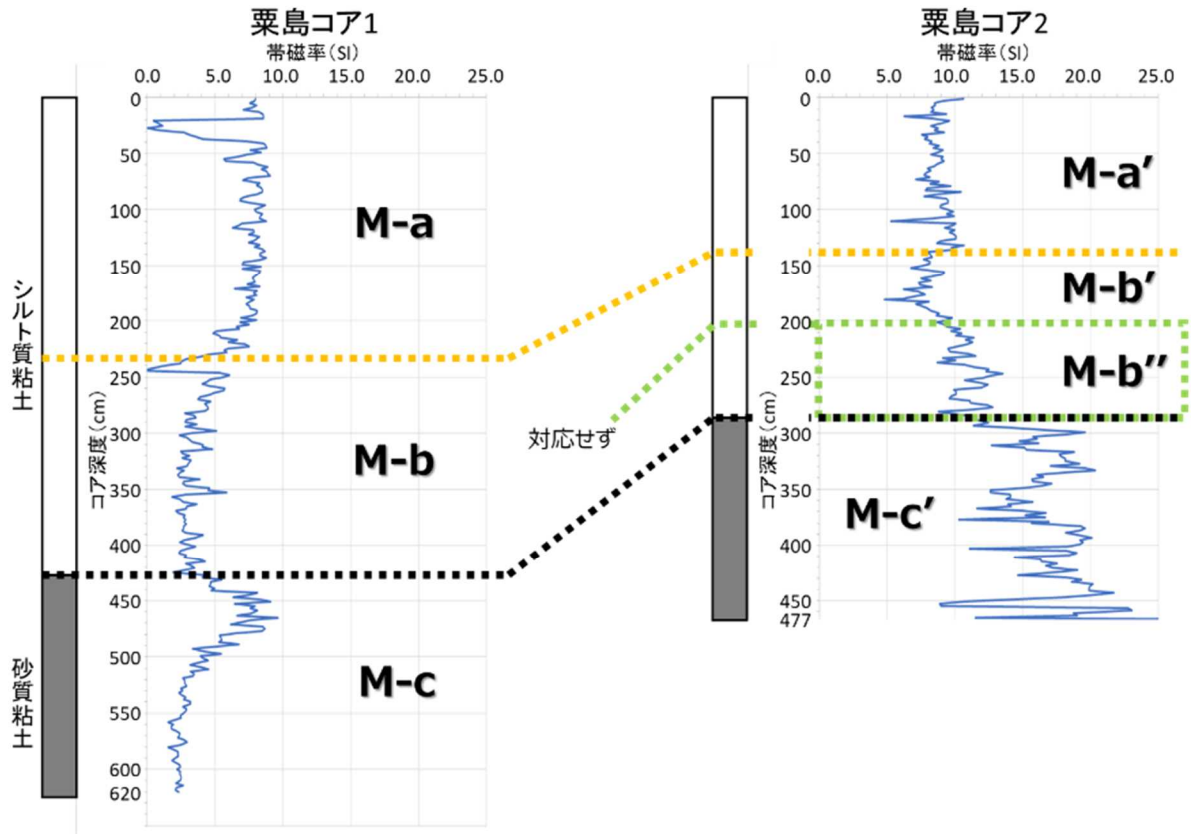
粟島1コア及び粟島2コアの分析結果から、それぞれ複数のイベントが認定でき、それらイベントを用いて複数の層準を対比することができた。この対比に基づく、2点間の層厚の差異は地震時の隆起・沈降の傾向を反映していると考えられ、通常用いられている帯磁率測定及び微化石分析が、完新統のコアを対象にした地震履歴の抽出に有用であることを示した。



出典) 東京大学 (2020) ³

図 2.1 粟島 1 コア及び粟島 2 コアの採取位置

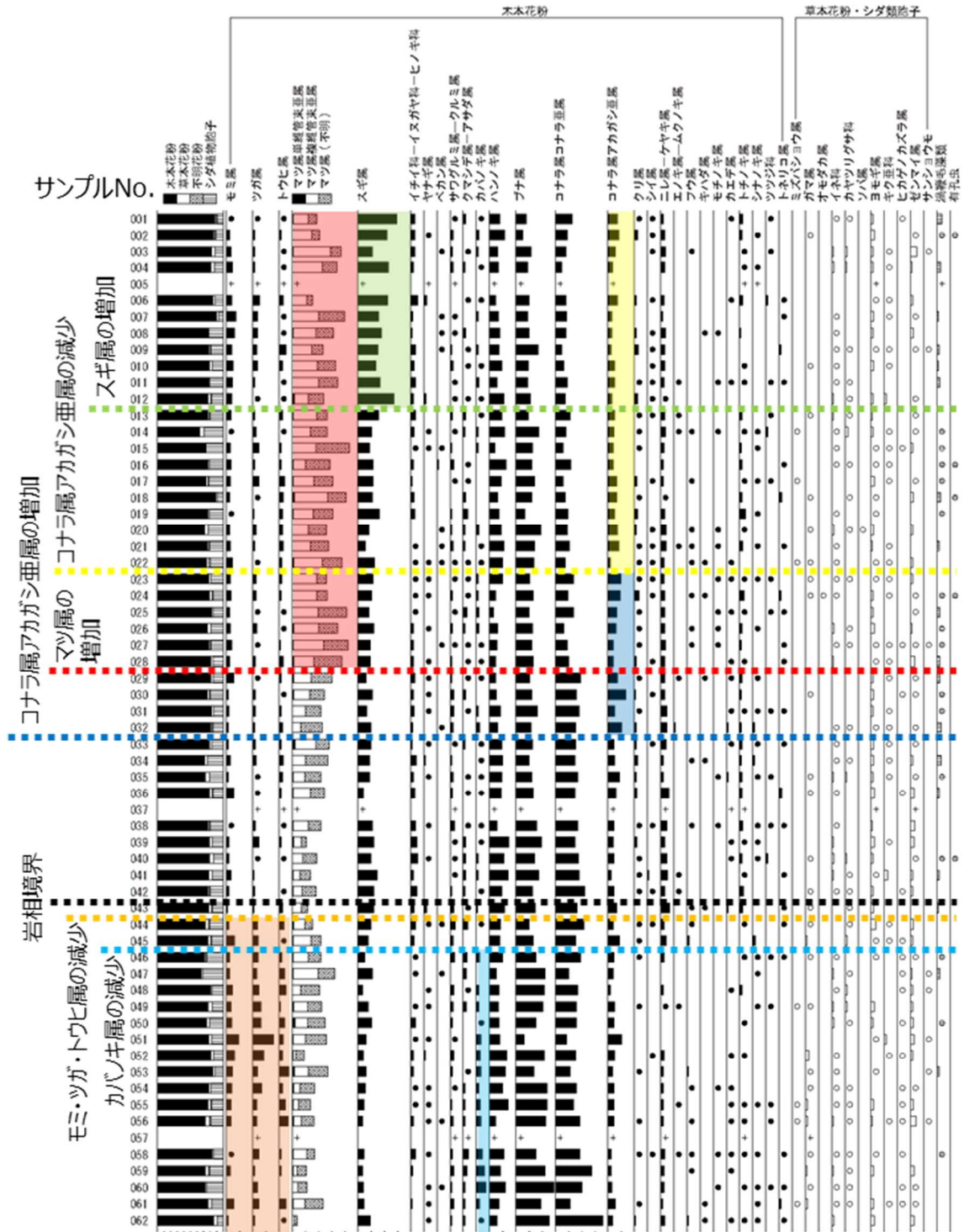
Fig. 2.1 Locations of Awashima-1 core and Awashima-2 core.



出典) 東京大学 (2020) ³ を改変

図 2.2 粟島 1 コア及び粟島 2 コアの帯磁率による対比

Fig. 2.2 Correlation of Awashima-1 core and Awashima-2 core based on magnetic susceptibility.

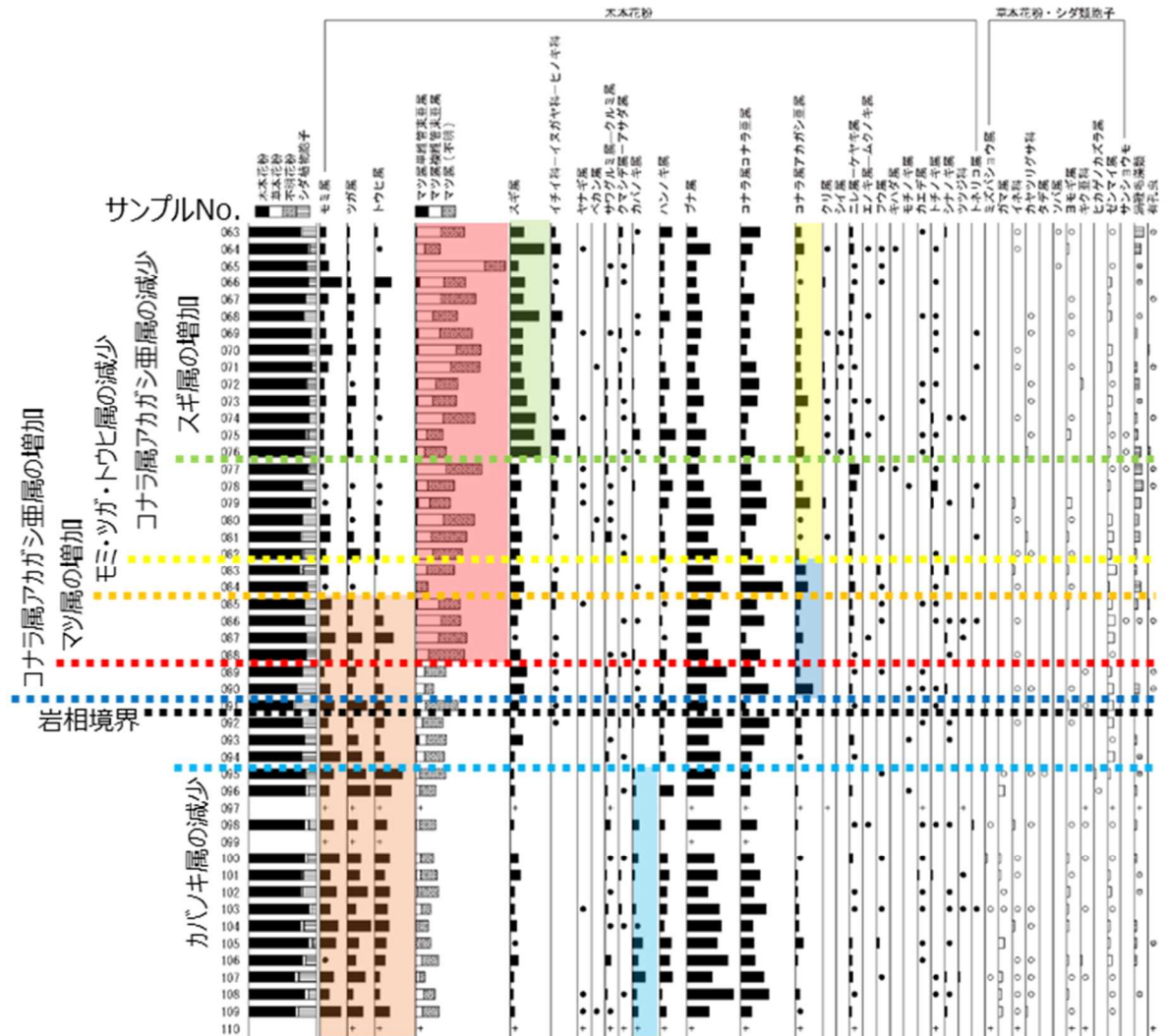


木本花粉は木本花粉総数、草本花粉及びシダ類孢子は総数から不明花粉を除いた数を基数として百分率で表した。○●は1%未満、+は基数が100個未満の試料において検出された種類を表す。10%

出典) 東京大学 (2020)³を改変

図 2.3 粟島 1 コアの花粉分析結果

Fig. 2.3 Result of pollen analysis of Awashima-1 core.



木本花粉は木本花粉総数、草本花粉及びシダ類孢子は総数から不明花粉を除いた数を基数として百分率で表した。○●(は1%未満、+は基数が100個未満の試料において検出された種類を表す。 10%

出典) 東京大学 (2020) ³ を改変

図 2.4 粟島 2 コアの花粉分析結果

Fig. 2.4 Result of pollen analysis of Awashima-2 core.

粟島1コア

粟島2コア

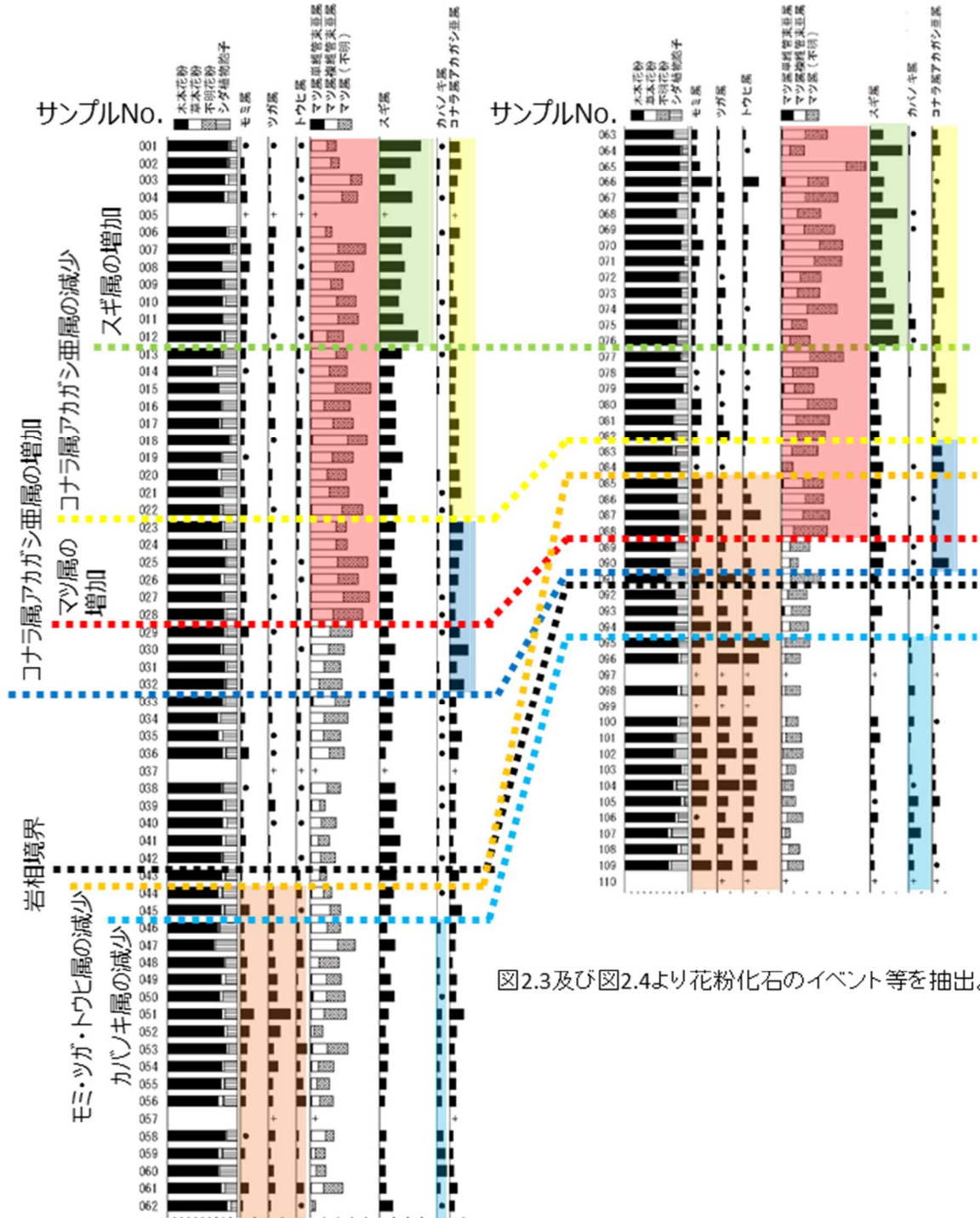


図2.3及び図2.4より花粉化石のイベント等を抽出。

出典) 東京大学 (2020) ³を改変

図 2.5 粟島 1 コア及び粟島 2 コアの花粉分析による対比

Fig. 2.5 Correlation of Awashima-1 core and Awashima-2 core based on pollen analysis.

2.1.2 イベント堆積物を用いた古地震履歴評価手法の整備

(1) はじめに

2.1.1 では、海域の内陸地殻内地震を対象にした確率論的地震ハザード評価及び確率論的津波ハザード評価の際に、地震の活動履歴が評価結果に与える不確実さの幅を軽減することを目的として、断層を挟んだ2点間の柱状採泥調査により、断層の活動した時期を推定する方法について検討した。この方法は、海域の活断層調査としては直接的方法ではあるものの、評価対象の断層の直上において柱状採泥調査を行う必要があり、調査の制限を受けるような海域では適用が困難な場合がある。また、堆積速度が遅い海域では、特徴的な堆積物の変位、厚さの変化、各種の測定値及び分析結果が、断層変位指標の深度差として現れにくくなる場合もある。

このような場合には、より間接的ではあるが、評価対象の断層近傍で柱状試料を採取し、イベント堆積物（主に砂質堆積物）から地震性堆積物を識別しその年代を見積もることにより、これらのデータを地震履歴の情報として利用する方法が挙げられる。ただし、イベント堆積物から地震性堆積物を識別する際には、砂質堆積物以外の肉眼視できない堆積物を認識し、1地点の情報のみならず複数地点においてイベント堆積物の時空間分布を把握した上で、分布の広さ、各種の分析結果等から総合的に判断することになる。そのため、分析対象のコアと既往のコアとの間での対比精度の向上が重要となる。

そこで、本研究では断層近傍で実施された柱状採泥調査によって得られた試料に対し完新統を対象に帯磁率測定及び微化石分析を実施し、イベント堆積物を対比する上でのこれらの分析手法の適用性を検討した。

なお、本研究は国立大学法人東京大学新領域創成科学研究科に委託し、実施したものである。

(2) 研究対象物質及び分析手法の検討

研究対象とした海域は別府湾であり、湾の南岸及び北岸に沿って中央構造線断層帯の豊予海峡—由布院区間が認識されている⁵。本海域から採取された1本のコア（以下「別府コア」という。）を用いて、コア解析を実施した（図 2.6）。別府コアはコア長が約 1,040cm であり、珪藻質の通常時の堆積物中に砂質のイベント層が挟在する。これらは半割後にラップで密封後、冷蔵保管されており、表面に多少の酸化の痕跡が認められたものの著しい乾燥等は認められず、保存状態は良好であった。また、後述する帯磁率測定は、堆積構造の観察用に採取されたスラブ試料を用いて測定した。これらは採取後、20cm 長のスラブごとにラップで密封された上、5-6 個のスラブからなるセクションごとにラップで包まれた状態で冷蔵保管されており、表面に多少の酸化の痕跡が認められたものの乾燥などは認められず、保存状態は良好であった。

コア解析は、地球物理学的測定として帯磁率測定を 2cm 間隔で実施した。また、分析コアの堆積年代の概要を把握するため、10 層準からバルク堆積物試料、4 層準から貝殻試料を採取し、バルク有機物及び炭酸塩を用いて放射性炭素年代測定を実施した。さらに、古環境学的分析として花粉分析及び珪藻分析を実施した。これらの分析についてはイベント層を避け、通常時の堆積物とみられる層準から 5cm 間隔で実施した。そのため、イベント層の挟在状況によっては 5cm 以下あるいはそれ以上の間隔で採取されている箇所もある。

(3) 帯磁率測定、珪藻分析及び花粉化石分析の結果

別府コアの岩相、帯磁率及び放射性炭素年代測定値をもとに、別府コアと既報の BP09-4 コア⁶との対比を試みた(図 2.7)。別府コアでは、低い帯磁率(SI 単位で 1 以下)が連続的に示される全体的な傾向に対して、5 以上の値を持つ帯磁率の高い層準が、複数挟在する。これらの帯磁率の高い層準は、肉眼で観察できる粒度の粗いイベント層にほぼ対応する。既往のコア⁶では、特にイベント層 3 及びイベント層 5 が厚いことが特徴である。別府コアでは、コアトップが厚いイベント層から始まっており、BP09-4 コアに見られる最上部の堆積物が欠如している可能性がある。また、既報⁶で示された貝殻の放射性炭素年代及び今回測定した貝殻の放射性炭素年代から、上位から 2 枚目のコア深度 2m 付近の厚いイベント層が既報⁶のイベント層 5 に、コア深度 7m 付近のものが既報⁶のイベント層 14 に当たるものと考えられる。次に、イベント層 5 及びイベント層 14 の対比結果並びにイベント層間の堆積物の厚さから、深度 3.2m 及び 2.8m の帯磁率のピークは、既報⁶のイベント層 7 及びイベント層 6 にそれぞれ対比される。さらに、コア深度 4.7m 付近のピークは既報⁶のイベント層 8 に、コア深度 5.2~5.5m 付近の帯磁率のいくつかのピークは既報⁶のイベント層 9 からイベント層 12 のイベント層が密集する層準に当たると考えられる。

珪藻分析の結果を図 2.8、図 2.9 及び図 2.10 に示す。全体を通じて海水生種及び海水〜汽水生種の珪藻が卓越し、これに低率で汽水生種、極低率で淡水生種を伴う構成となっており、種構成は僅かに変わるものの、層準による群集組成の大きな変化はない。そのことから、全体を通じて内湾でありながら陸水の影響は少なく、外洋水の影響を強く受ける環境が継続していたと考えられる。ただし、コア深度 3.5~5m 程度にかけては、外洋生種の割合が若干変動するため、外洋水の影響の強弱があった可能性がある。特に、コア深度 4.3~7.3m にかけて、汽水性種 *Diploneis aestuarii* が比較的多産することが特筆され、別府湾におけるコア対比に有効な指標となる可能性がある。

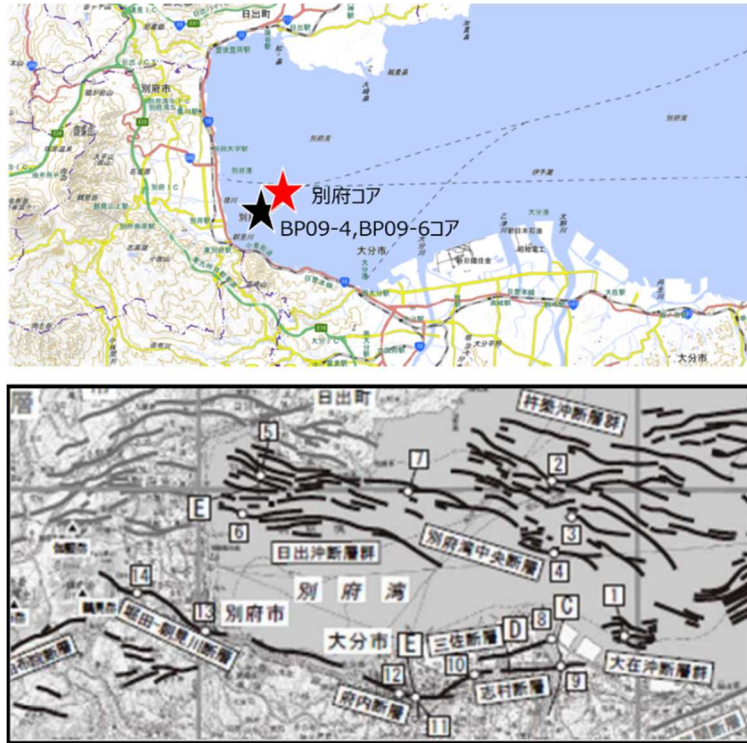
花粉分析の結果から、別府コアと既往の BP09-6 コア⁷との対比を試みた(図 2.11)。別府コアでは、全体を通してアカガシ亜属及びシイ属が優先する照葉樹林の植生を示し、顕著な群集変化は認められない。僅かにコア下部でのマキ属の連続的な産出、コア上部での草本類及びマツ属の増加、及びこれに伴うアカガシ亜属とシイ属の減少が認められる。これらを基準に、アカガシ亜属及びシイ属にマキ属が随伴する別府 1 花粉帯、アカガシ亜属

及びシイ属が優先する別府2花粉帯、アカガシ亜属及びシイ属にマツ属と草本類が伴う別府3花粉帯に区分できる。さらに、草本類の増加が別府2花粉帯の最上部から認められるため、草本類の増加開始期により別府2花粉帯を別府2a及び2bの亜帯に細分した。一方、既報⁷では、別府湾の約7,000年前以降の花粉群集は4つに区分されており、下位からアカガシ亜属及びシイ属の照葉樹が卓越し、これにマキ属が随伴するBEP-1帯、アカガシ亜属及びシイ属の照葉樹が卓越するBEP-2帯、照葉樹に二葉マツ類及び草本類が加わるBEP-3帯、二葉マツ類及びスギ属が卓越するアカマツ二次林を示唆するBEP-4帯からなる。別府コアで得られた花粉群集の3つの花粉帯（別府1～3帯）は、その群集構成から既報⁷のBEP-1～3帯にそれぞれ対比される。また、BEP-2帯の上部では草本類の増加が認められることから、別府2帯の二つの亜帯の境界も既報⁷の結果と対比可能である。

既報のBP09-6コア⁷で示された花粉帯の境界年代を、既報のBP09-4コア⁶のイベント層の年代値に挿入した(図2.12)。これらと別府コアの花粉帯の境界層準とを比較すると、別府2帯の亜帯の境界層準が僅かに異なるが、ほぼ同様な層準に存在し、帯磁率のピーク対比もおおよそ妥当であると考えられる。

(4) まとめ

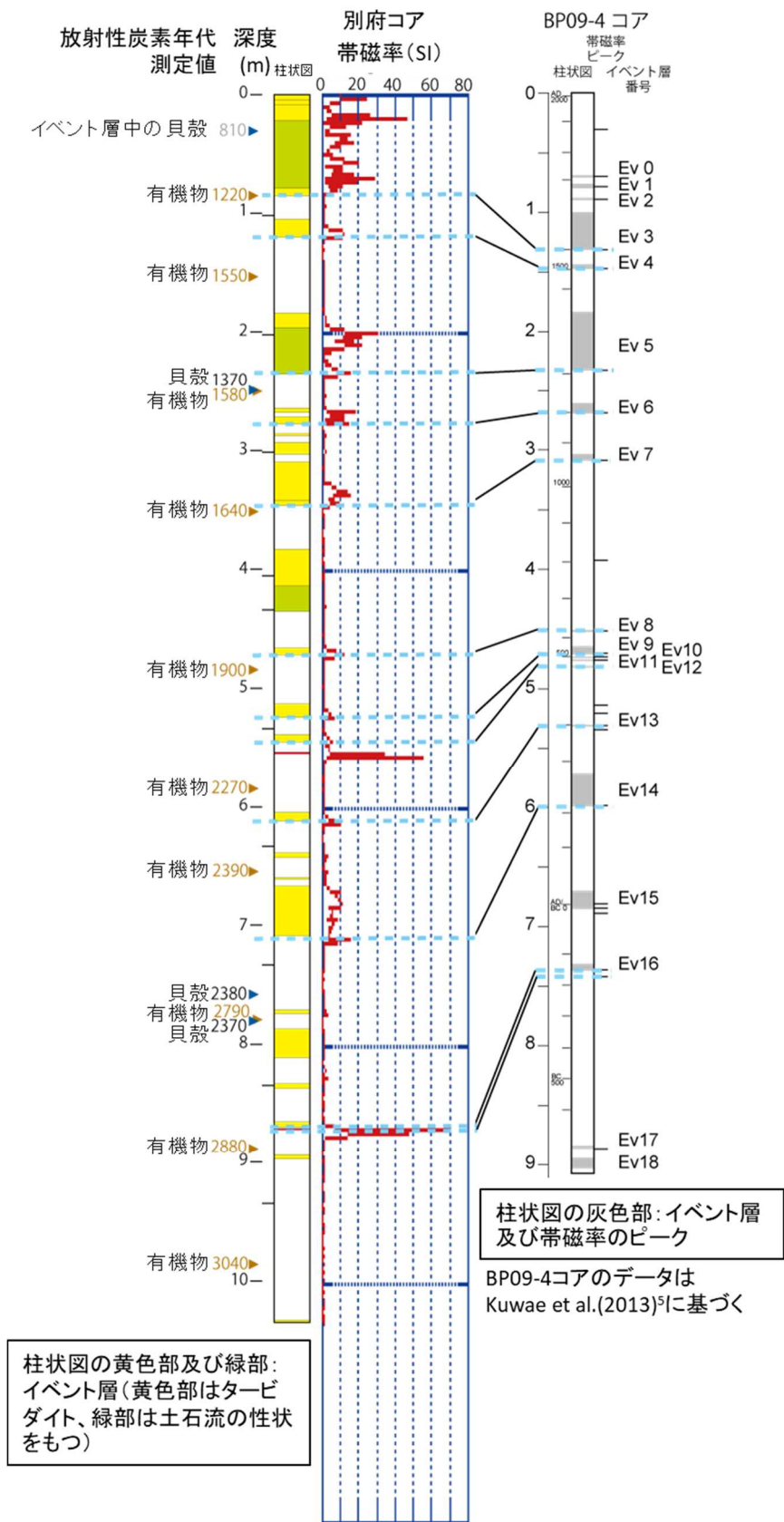
別府コアの解析結果から、放射性炭素年代測定値が得られている層準が限られていても、帯磁率変化のピーク対比と花粉群集変化を組み合わせることで、近傍コアとの対比面を多く得られる可能性があることを示した。また、別府コアと別府湾最深部のBP09-4コア⁶のコアとの対比の例のように、近傍コアの年代モデルが精緻であれば、対比面を介して検討するコアに信頼性の高い年代目盛を入れることが可能であることも示した。より地理的に離れた場所での対比の可能性が検討されることによって、地球物理学的手法及び古環境学的手法のコア対比への適用可能性とその限界がより明らかになると期待できる。



出典) 地理院地図 (国土地理院)⁴ 及び地震調査研究推進本部 (2017)⁵ を利用して作成

図 2.6 別府コアの採取位置及び活断層の分布

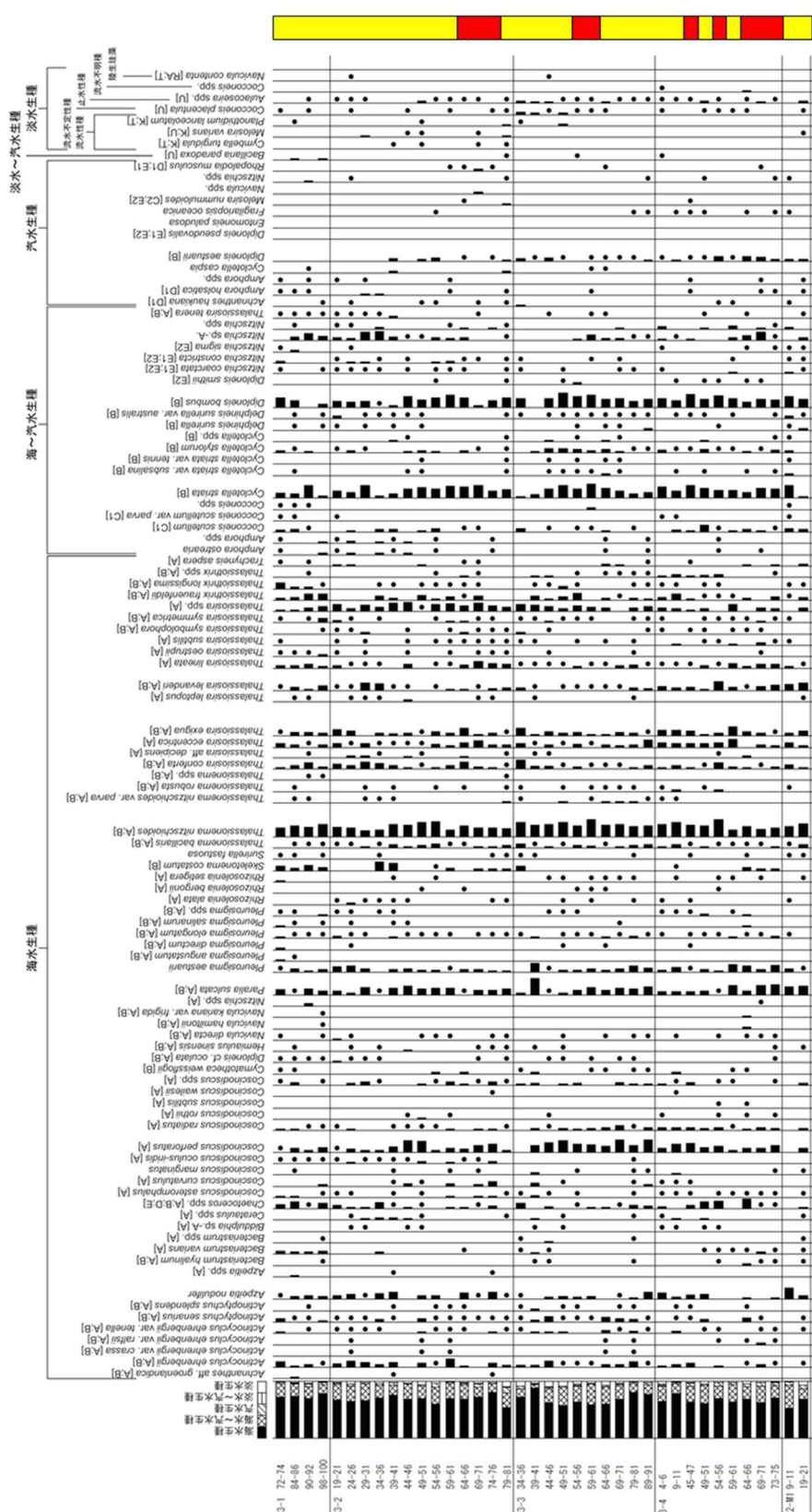
Fig. 2.6 Location of Beppu core and distribution of active faults.



出典) 東京大学 (2020) ³ を改変

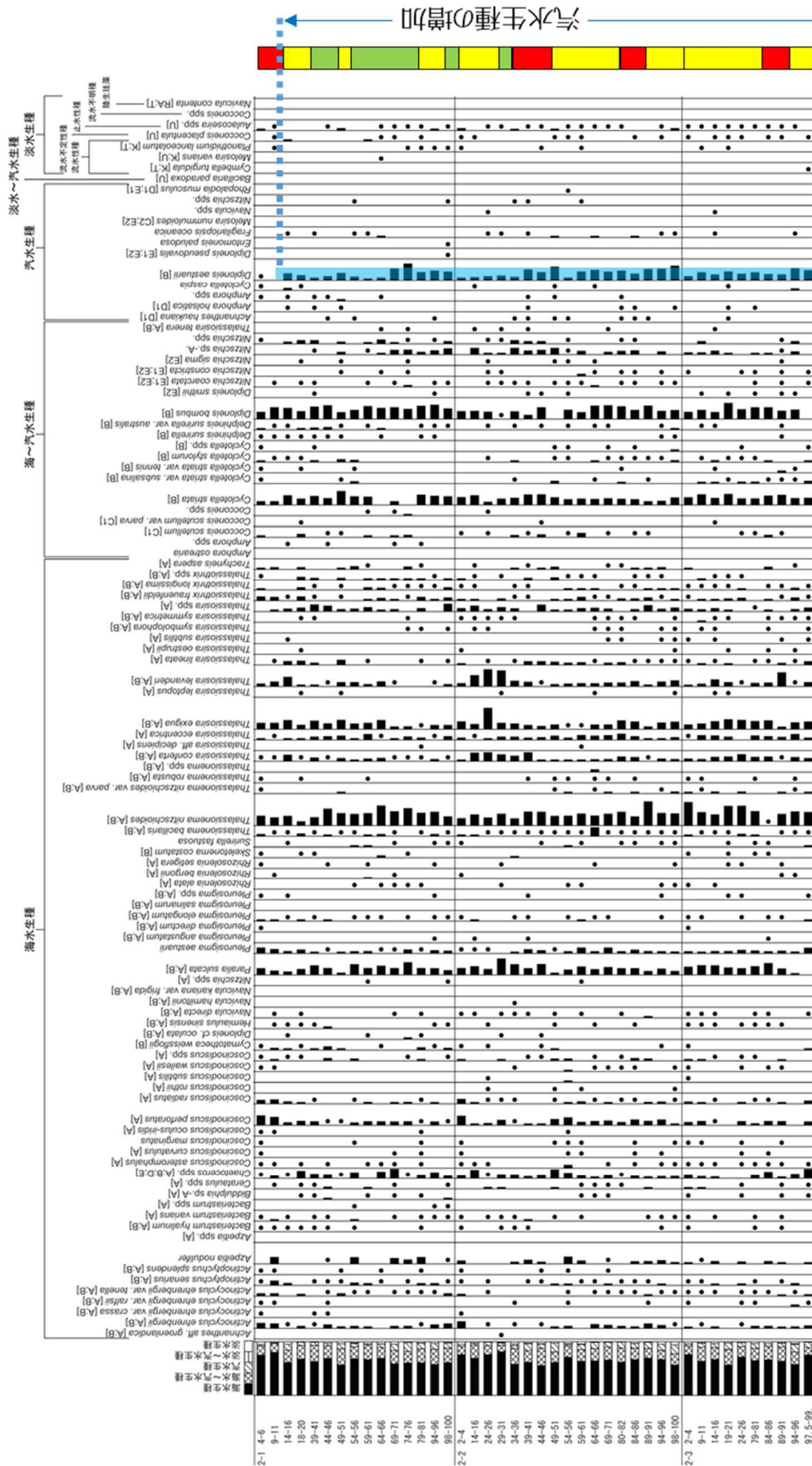
図 2.7 別府コア及び既報 BP09-4 コアの帯磁率による対比

Fig. 2.7 Correlation of Beppu core and BP09-4 core based on magnetic susceptibility.



出典) 東京大学 (2020) ³ を改変

図 2.8 別府コアの珪藻花粉分析結果 (上部)
 Fig. 2.8 Diatom analysis of Beppu core (Upper part).



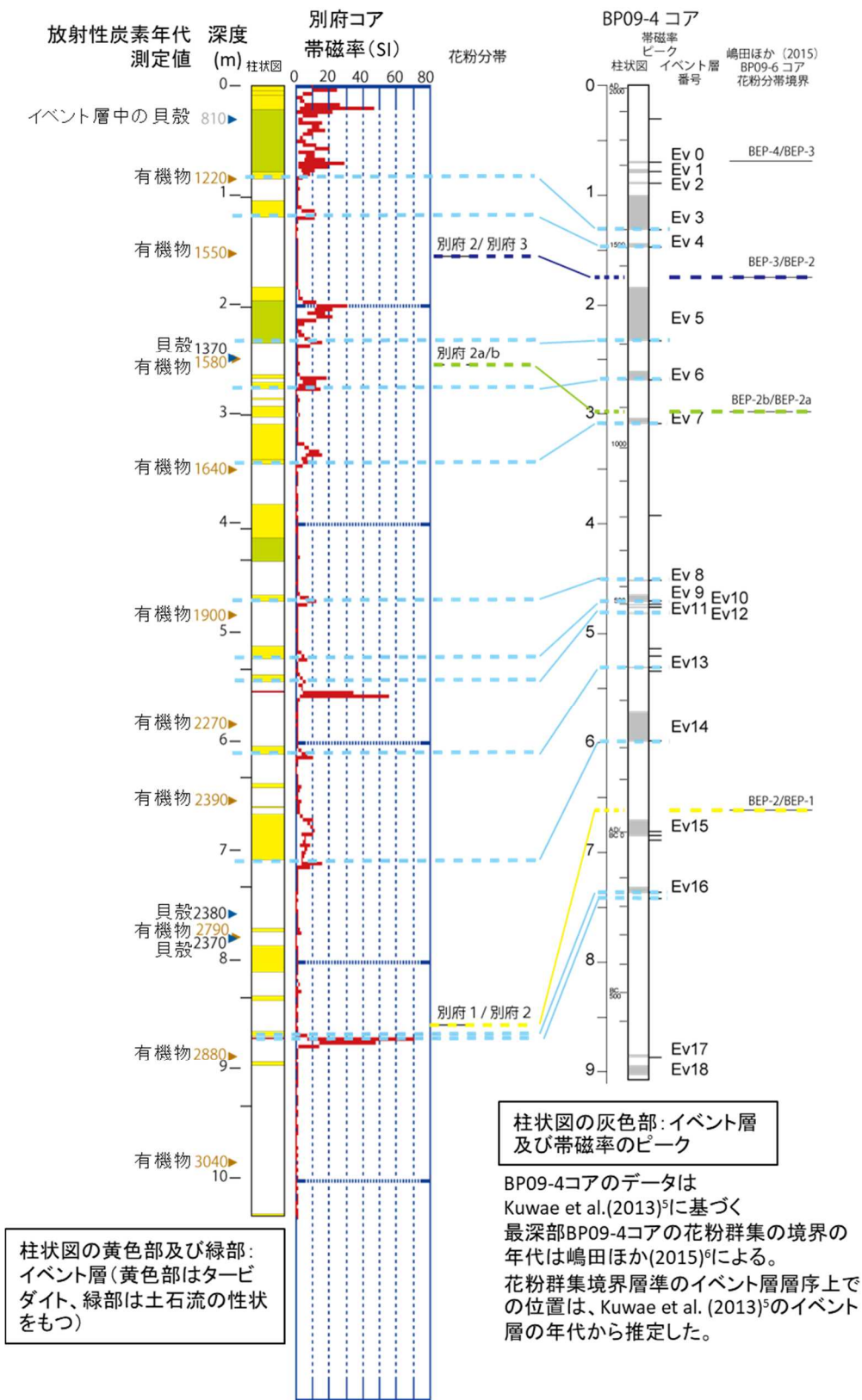
産出頻度 10%
 赤(A)：1mm²中に50個体以上
 黄(C)：1mm²中に10個体以上
 緑(F)：2mm²中に10個体以上

海水～汽水種淡水生種産出率・各種産出率は全体基数、淡水生種の生態性の比率は淡水生種の合計を基数として百分率で算出した。いずれも100個体以上検出された試料について示す。なお、●は1%未満、+は100個未満の試料において検出された種類を表す。

出典) 東京大学 (2020) ³ を改変

図 2.9 別府コアの珪藻花粉分析結果 (中部)

Fig. 2.9 Diatom analysis of Beppu core (Middle part).



出典) 東京大学 (2020) ³ を改変

図 2.12 帯磁率及び花粉分析に基づく別府コアと最深部コア BP09-4 コアとの対比

Fig. 2.12 Correlation of Beppu core and BP09-4 core based on magnetic susceptibility and pollen analysis.

2.1.3 火山灰層序学的年代評価手法の整備

(1) はじめに

新規基準に記載された中期更新世以降（約 40 万年前以降、MIS 11 以降にほぼ対応）の断層変位指標の年代決定において、高い時間分解能を有する長期間記録媒体である深海底堆積物を活用することが極めて重要である。なぜなら、深海底堆積物は、テフラ層序、微化石層序、酸素同位体層序及び古地磁気層序によって相互の年代がクロスチェックされるため、これら層序学的年代の信頼性向上が見込めるからである。また、テフラは、給源火山から広範囲に飛散・移動し、海域のみならず陸域にも分布しているため、深海底堆積物中のテフラを陸成堆積物中のテフラと対比できれば、信頼性の高いテフラ年代を海域、陸域で共有することが可能になる。

テフラの対比は、通常、火山ガラスの化学組成を指標として行われる。なぜなら、深海底堆積物中では風化によって火山ガラスが溶解せず、初生的な化学組成が保持されるためである。しかしながら、断層変位指標として有用な海成段丘に載る陸成堆積物（古土壌、レス及び崩積土）において、火山ガラスはしばしば風化（特に水が関係した化学反応）によって溶解するため、ガラス質の広域テフラは残存していないことが多い。そのため、陸成堆積物の編年には、火山ガラスの代替指標の整備、すなわち風化に抵抗性の強い鉱物がテフラ対比の指標として妥当であるかの確認が必要とされる。

テフラにおいて、かんらん石、輝石族、角閃石族及び鉄チタン酸化物は普遍的に含まれる鉱物である。最近、Matsu'ura et al. (2014a)⁸は、下北沖の深海底堆積物（ちきゅう C9001C 孔コア：図 2.13）において、斜方輝石及び角閃石粒子の濃集からテフラ及びクリプトテフラ（の可能性のあるもの）を認定した。これらは深海底堆積物中のテフラと陸成堆積物中の風化テフラとを対比するのに有効と考えられる。斜方輝石は累帯構造により広い化学組成範囲を示す可能性があることから、テフラの特徴化及び対比に不利である。そのため、角閃石族の化学組成を指標としたテフラの対比を試みる必要がある。

C9001C 孔の風上に位置する下北半島では、海成段丘が発達し、隆起速度及び断層活動の指標となっている⁹。海成段丘は、テフラによって編年されているものの、年代精度（MIS への対比の信頼性）が低い。これは、複数のテフラの層位が放射年代と一致しないこと、あるいは深海底コアでの層位が不明であるため MIS への対比が未決定であること、があげられる。このような背景から、本研究では、深海底堆積物（C9001C 孔）の中期更新世以降のテフラ層序を高精度化し、風化に抵抗性のある鉱物を指標としたテフラ層序の構築及びテフラの対比手法を検討した。この結果に基づいて、下北半島に分布する海成段丘編年を再検討した。

(2) 研究対象物質及び分析手法の検討

C9001C 孔の全コア長 (365.33 m) を対象に、アーカイブコア (長期保管用のコア) に含まれるテフラ層及びその間の堆積物を 10 cm 間隔で試料採取した。テフラ層の層厚が 10 cm 未満の場合には、その層厚に応じて試料採取した。同時に、C9001C 孔コア中のテフラに対比が期待される陸域テフラについても、野外踏査により試料採取した。

採取された試料について、前処理・純化を施した後、鉱物観察用スライドガラスの上に封入して粒子組成観察用薄片を作成した。次に、偏光顕微鏡を用いて薄片観察し、テフラ粒子の同定を行い、3,000 粒子中の構成比を求めた。本研究では、角閃石粒子を多産する層準がテフラ層準を示すものと推定し、3,000 粒子中の火山ガラス粒子含有数を求めた (図 2.14)。さらに、テフラを識別するために、エネルギー分散型 X 線マイクロアナライザーを用いて角閃石粒子の主成分化学組成を測定した。

(3) 角閃石を指標とした深海底堆積物—陸成堆積物におけるテフラの対比

下北半島沖の深海底堆積物 (C9001C 孔コア; 図 2.13) において、笠森 5 テフラ (Ks5) は、MIS 12b-c (43~46 万年前) とされているため¹⁰、それより上位にある堆積物は MIS 11 及びそれより新しい時代に対比される (図 2.14)。その堆積物から検出された角閃石粒子の多産層準は、時代の新しい方から古い方に向かって、A1~A37 と整理される (図 2.14)。これら A1~A37 を構成する角閃石粒子の中で、火山ガラスを付着させているものはテフラ起源であると判断し、その角閃石粒子を含む 20 層準を対象にして主成分化学組成を測定した (図 2.15)。角閃石粒子多産層準のうち、A30、A34、A37 及び A50 に含まれる角閃石は著しくカリウム (K) に乏しい (図 2.15a : A50 は MIS 11 よりも著しく古い層準のため、今回記載対象としない)。A30、A34 及び A37 中の角閃石は、カルシウム (Ca) 及び K 含有量からは識別することは難しい (図 2.15b)。しかし、マグネシウム (Mg) 含有量を指標にすると、A34 の角閃石は A30 及び A37 のそれらから識別可能である (図 2.15c)。

A30、A34 及び A37 は、C9001C 孔の酸素同位体層序から、MIS7 初期~MIS9 末期と推定される (図 2.14)。この年代に対応したテフラとして、C9001C 孔に最も近い恐火山 (図 2.13) から噴出した、田名部 A、B 及び C テフラ (以下それぞれ「Tn-A」、「Tn-B」及び「Tn-C」という。) が、マグマ本質物質を有するものとして知られている¹¹。Tn-A~C は、層位的には Tn-A、-B、-C の順に古くなるが、既報の放射 (フィッショントラック) 年代は、Tn-A 及び Tn-C がそれぞれ 35 ± 6 万年前 (1SD) 及び 18 ± 4 万年前 (2SD) とされており^{12,13}、年代の逆転がみられる。また、Tn-B の放射年代は報告されていない。

海成段丘を覆う陸域堆積物中に産出する Tn-A~C において、火山ガラスは長期間の風化によって消失している一方、角閃石は風化に対して抵抗性があるために残存している。Tn-A~C の角閃石の化学組成は、同一火山から噴出したため、相互に類似しているが、Tn-A は Tn-C に比べて Ca 及び Mg 含有量が低い傾向がみられる (図 2.15c)。また、Tn-B は Tn-

A 及び Tn-C の中間的な性格を示す。これら Tn-A~C の角閃石の化学組成は、Tn-C が A34 の組成範囲と最も類似することを示すことから、Tn-C と A34 とは対比される可能性が高い。さらに、Tn-C 及び A34 の角閃石は、粒子内で化学組成が大きく変化するような累帯構造を示さないため、1 ポイント/粒子の分析に基づいて測定された多くの粒子の組成範囲 (図 2.16) は、各テフラを代表すると判断される。ただし、Tn-C と A34 との対比確度を上げるために、新たな指標 (例えば角閃石の微量化学組成) を検討することは今後必要である。

(4) 深海底堆積物の年代モデルを用いたテフラの年代決定及び放射年代の比較

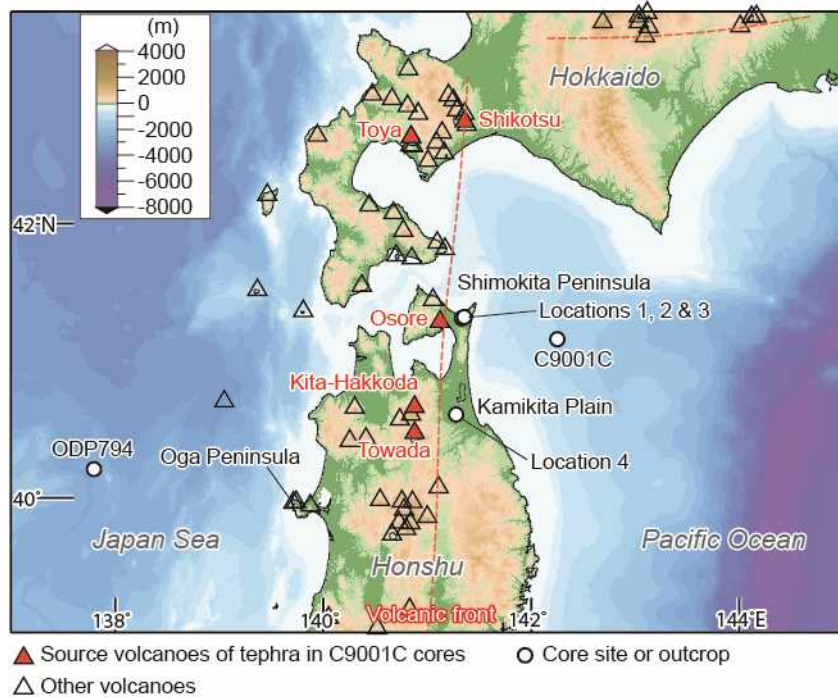
Tn-C の噴出年代は、A34 の深度を C9001C 孔の年代モデルを用いて年代に変換することで得ることができる (図 2.17)。ここで、C9001C 孔の年代モデルは複数提示されているため、用いるモデルによって Tn-C の年代が変化する。Domitsu et al. (2011)¹⁴、Matsu'ura et al. (2014a)⁸ 及び Matsu'ura et al. (2017)¹⁵ のモデルを用いると、Tn-C はそれぞれ 23.1、25.7 及び 28.0 万年前と算出され、前者は MIS 7、後二者は MIS 8 に対応する (図 2.17)。Domitsu et al. (2011)¹⁴ のモデルは、MIS 7 に相当するコア長が著しく長い (=堆積速度が速い) ことに特徴がある。一方、Matsu'ura et al. (2014a)⁸ 及び Matsu'ura et al. (2017)¹⁵ のモデルは堆積速度が異様に速い期間を想定する必要がなく、ほぼ安定した堆積速度を示すため、C9001C 孔掘削地点 (深海) の堆積環境を最も良く説明できるという信頼性をもつ。また、Matsu'ura et al. (2014a)⁸ のモデルは 2 枚のテフラ (ODP794 2H-2-120 及び塩原大田原テフラ : 図 2.14) の既報年代に強く拘束されているが、これらの年代精度は必ずしも高くない。そのため、広域テフラと酸素同位体層序との層位関係が調和的な Matsu'ura et al. (2017)¹⁵ のモデルが、現在、最も信頼性が高いと考えられる。このモデルを用いて算出された Tn-C の年代 (約 26 万年前) は、MIS 8 に対応するとともに、既報の放射年代 (18±4 万年前) よりも大幅に古いことは確実と考えられる。

新たに決定された Tn-C の年代に基づき、下北半島北東部における海成段丘編年を再検討する。海成段丘は、比高、連続性及び開析の程度に基づいて T4~T1 段丘に分類されており⁹、T4 段丘は、段丘構成層と洞爺テフラ (MIS 5d) との層位により、T2 段丘は段丘構成層と Tn-C との層位 (MIS 8) により、それぞれ MIS 5e 及び MIS 9 に対比される。このことから、年代指標のない T3 段丘 (T2 と T4 段丘との間) は、合理的に MIS 7 に対比される。T1 段丘は、段丘構成層と Tn-C との間に厚いレスが存在することから、MIS 9 よりはるかに古く、おそらく MIS 11 に対比される。

(5) まとめ

本研究により、深海底堆積物を用いてテフラ年代を高精度に決定するとともに、風化に抵抗性のある鉱物の化学組成を指標にして、深海底堆積物中のテフラを陸成堆積物中のテ

フラと対比することができた。これにより、海域及び陸域において信頼性の高いテフラ年代を共有することが可能となり、断層変位指標である海成段丘の年代妥当性評価に活用できる見通しを得た。

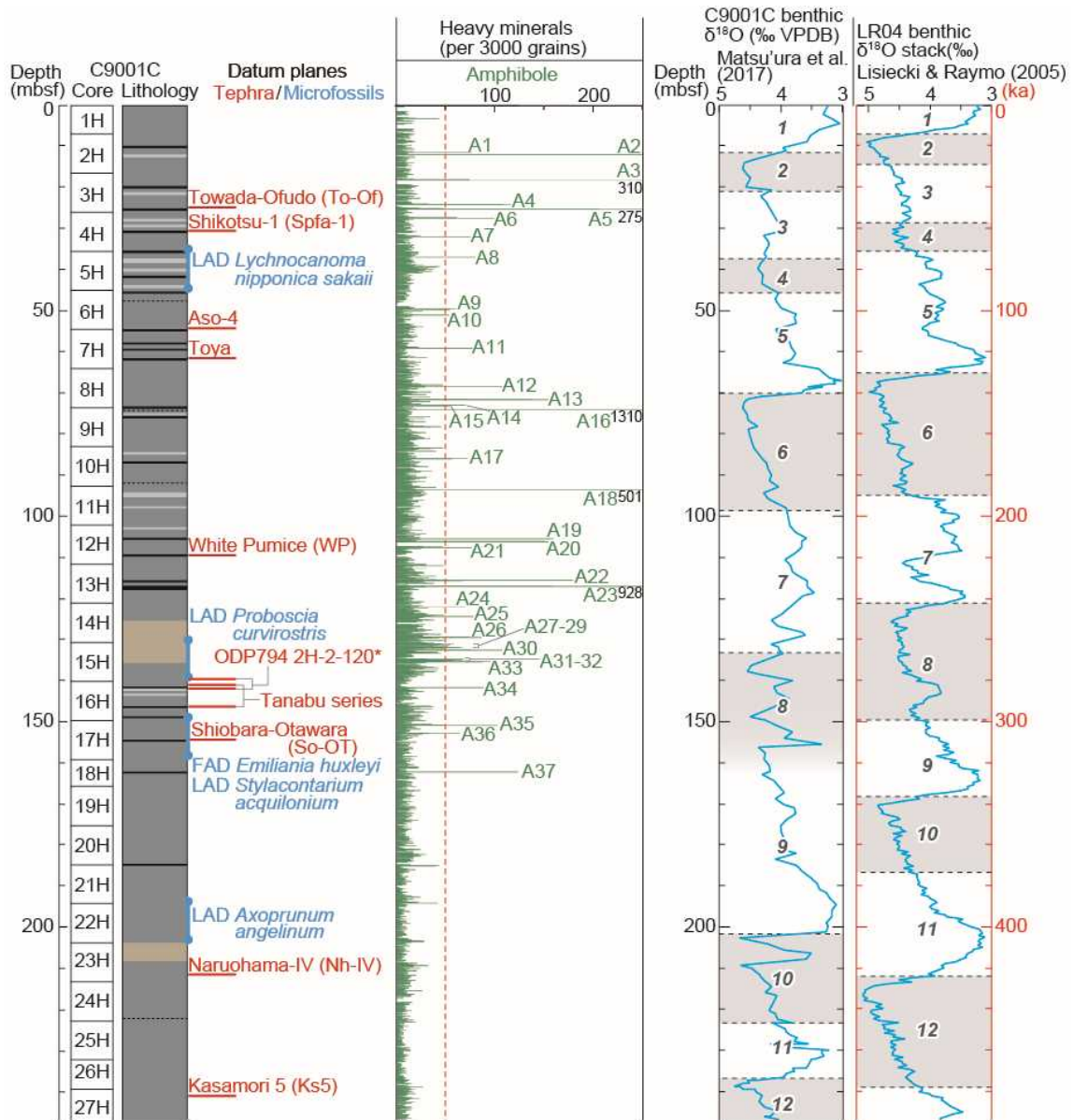


出典) Matsu'ura and Komatsubara (2017)¹⁵

図 2.13 下北沖 C9001C 孔の位置

Fig. 2.13 Locations of site C9001C off Shimokita Peninsula.

注) C9001C 孔のテフラ供給火山 (赤い三角) の位置も示す。



出典) Matsu'ura and Komatsubara (2017)¹⁵ より、1-27H コアまでを抜粋

図 2.14 ちきゅう C9001C 孔の層相、微化石年代層序、テフラ層序及び
海洋酸素同位体層序

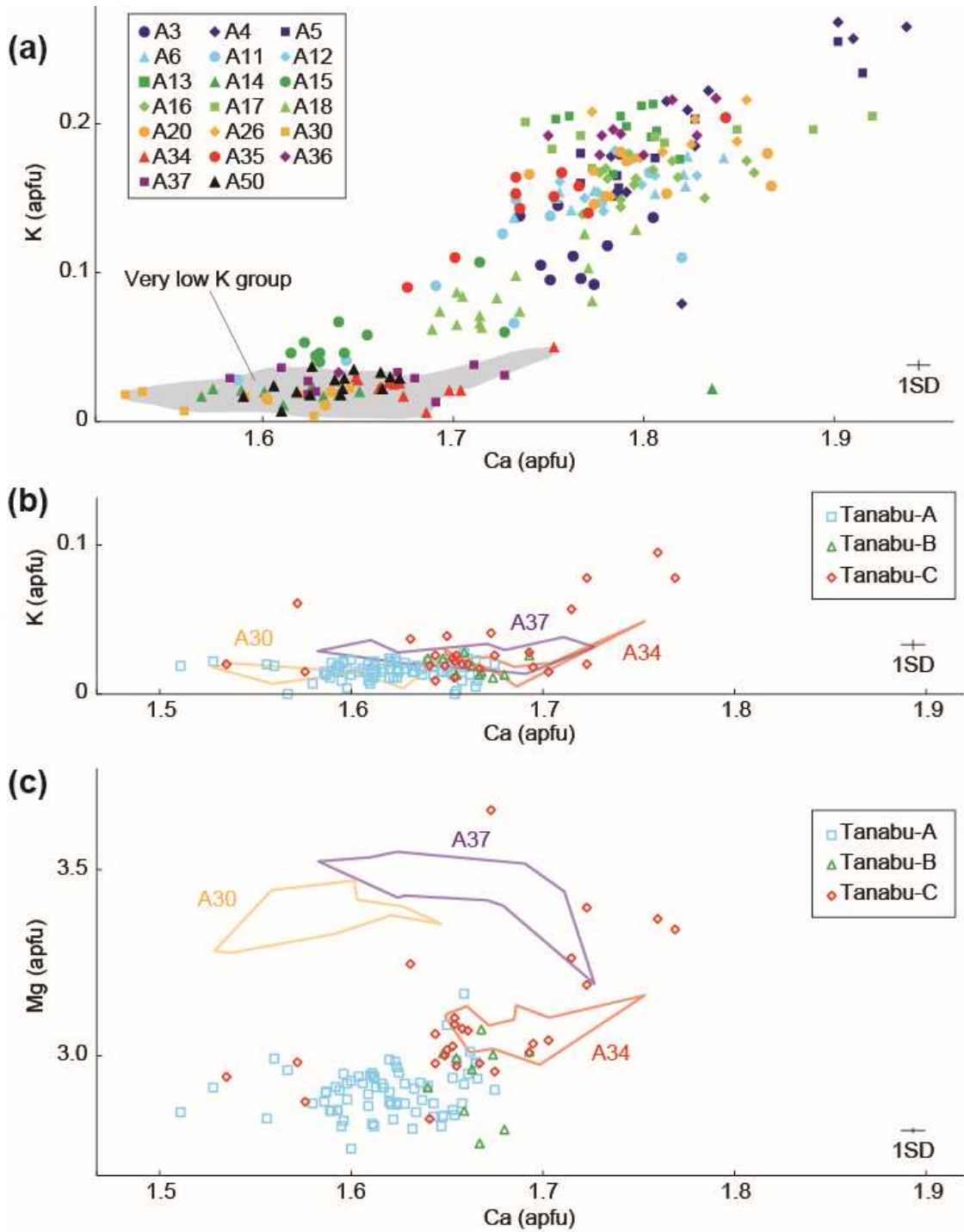
酸素同位体比曲線に付されている数字は海洋酸素同位体ステージ (MIS) を示す。

Matsu'ura et al. (2017)¹⁰、Lisiecki and Raymo (2005)¹⁶ を参照。

Fig. 2.14 Core lithology, biostratigraphy, tephrostratigraphy
and marine oxygen isotopic stratigraphy of Hole C9001C.

The numbers of oxygen isotopic records indicate Marine Isotopic Stage (MIS).

Matsu'ura et al. (2017)¹⁰ and Lisiecki and Raymo (2005)¹⁶ are referred.

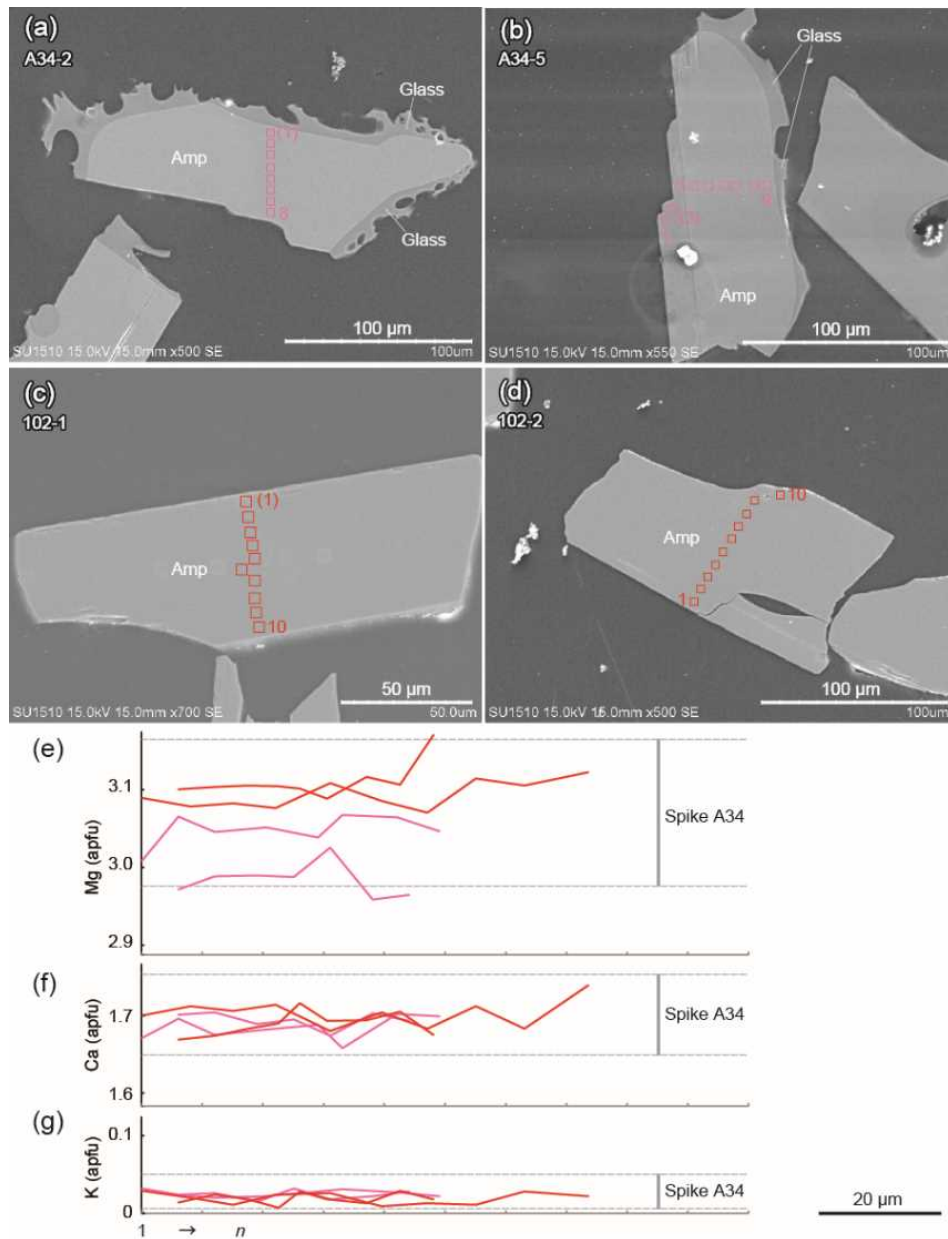


出典) Matsu'ura and Komatsubara (2017)¹⁵をコンパイルした

図 2.15 テフラに含まれる角閃石粒子の化学組成

Fig. 2.15 Chemical compositions in amphibole group of tephra in cores of Chikyu Hole C9001C.

注) (a) C9001C 孔コア中の角閃石族の Ca-K プロット、(b), (c) 陸成堆積物中におけるテフラ中の角閃石の Ca-K、Ca-Mg プロット。apfu は原子数 (atoms per formula unit)。

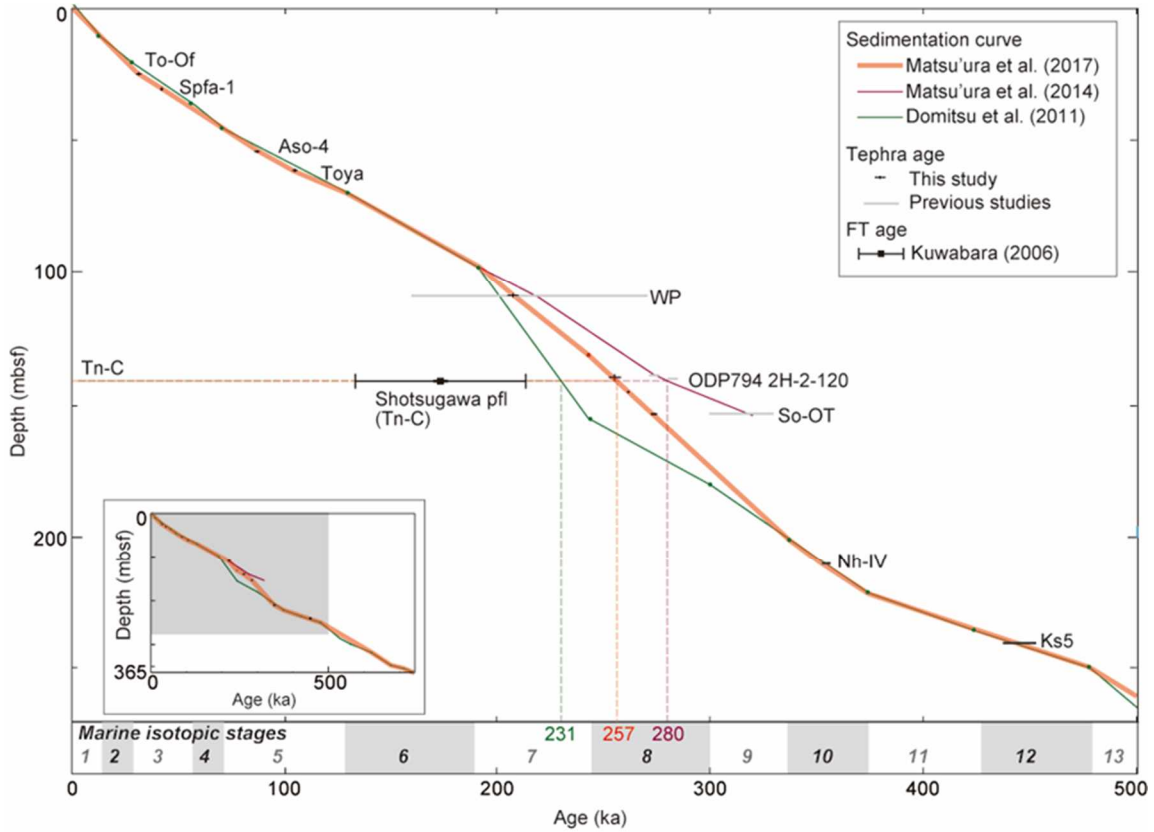


出典) Matsu'ura and Komatsubara (2017)¹⁵ を改変

図 2.16 角閃石粒子の SEM 画像及び単一粒子内の累帯構造

Fig. 2.16 Scanning electron microscopy (SEM) images of amphibole grains and chemical variation within single grains.

注) (a), (b) A34 に含まれる角閃石粒子の SEM 画像。(c), (d) Tn-C テフラに含まれる角閃石粒子の SEM 画像。四角はビーム領域で数字は分析番号。括弧内の番号 ((a) の(1)、(b)の(2)、(c)の(1)) は、低品質 (分析トータルが 98–102 重量%濃度に収まらないもの) のため棄却。(e)–(g) 角閃石粒子の累帯構造、横軸は(a)–(d)の測定位置に対応する。A34 における 1 粒子当たり 1 分析による化学組成範囲も示す。



出典) Matsu'ura and Komatsubara (2017)¹⁵

図 2.17 ちきゅう C9001C 孔の深海底堆積物のテフラ層序、微化石年代層序及び年代モデル

Matsu'ura et al. (2017)¹⁰、Matsu'ura et al. (2014b)⁹、Domitsu et al. (2011)¹⁴ 及び桑原 (2006)¹² を参照。

Fig. 2.17 Tephrostratigraphy, biostratigraphy and age models of Chikyū Hole C9001C Matsu'ura et al. (2017)¹⁰, Matsu'ura et al. (2014b)⁹, Domitsu et al. (2011)¹⁴ and Kuwabara (2006)¹² are referred.

2.2 プレート間地震の履歴に関する評価手法の整備

2.2.1 放射性炭素年代測定による隆起年代評価手法の検討

(1) はじめに

2.1.1 及び 2.1.2 で述べたように、海域ではトレンチ調査が実施できないことから、特に海域活断層に起因する内陸地殻内地震を対象にした確率論的地震ハザード評価及び確率論的津波ハザード評価では統計的に推定された活動間隔が用いられることが多く、評価結果に与える不確実さの幅が大きくなることが課題である。一方、プレート間地震を対象にした上記の評価においては、これまで主として歴史地震の情報が利用されてきた。しかしながら、2011年東北地方太平洋沖地震の教訓を踏まえると、歴史地震のみならず、より活動間隔が長い地震も対象にした先史時代における地震履歴の情報を整理し、その扱い方を検討することが重要である。

プレート間地震のうち活動間隔が長い地震の活動履歴を評価する方法として、主として深海底コア（堆積物）中のイベント堆積物の情報を利用する方法、沿岸隆起に起因する離水海岸地形及び離水生物群集の年代測定に基づいた方法が挙げられる。このうち前者については、大規模な研究プロジェクトによって推進されることが多く、研究の進展に依存する課題であるが、後者についてはプレート間地震のみならず、沿岸域の内陸地殻内地震にも適用可能な方法であり、離水海岸地形の認定によっては沿岸域の内陸地殻内地震の想定に直結することから、優先度は高い課題であると言える。

離水海岸地形の隆起年代を測定するには、これまで主として離水海岸地形に付着する離水生物群集遺骸の放射性炭素年代測定が用いられてきた。これは、隆起前に海水中で生存していた海生生物が形成した石灰質の殻等を用いて放射性炭素年代を測定する方法であるが、測定対象の試料をあらかじめ酸処理することが通例となっており、その濃度の影響の程度についてはよく分かっていない。また、測定する石灰質物質の違いが測定結果に与える影響についても不明な点が多い。

そこで、本研究では、隆起年代を評価する際の結果のばらつき（酸処理濃度及び測定試料の対象の違い）を把握するため、すでに隆起したことが明らかな地域において離水海岸地形を認定し、高度分布及びその地形面が形成された年代を検討した。

(2) 対象地域

隆起年代を評価する際の結果のばらつきのうち、酸処理濃度の差異による影響を検討するためには、歴史地震に対応する離水生物群集遺骸が産出し、かつ完新世段丘に関する既往研究例が多いことが条件となる。そこで、元禄関東地震（1703年）及び大正関東地震（1923年）による離水海岸地形が発達する三浦半島（城ヶ島地区及び荒崎地区）を選定した。また、測定試料の対象の差異による影響を検討するためには、離水生物群集遺骸が豊富に産出することが条件となる。そこで、高知県足摺岬（松尾地区）を選定した。

(3) 三浦半島（城ヶ島地区及び荒崎地区）における地形面の年代測定結果

城ヶ島及び荒崎における完新世段丘は海岸侵食地形面として認識でき、高位より A1 面、A2 面、A3 面、G 面及び T 面に区分した（図 2.18 及び図 2.19）。既往研究¹⁷を参照し、城ヶ島については元禄関東地震（1703 年）による隆起ベンチと考えられる標高約 1.5～3.0m の地形面を G 面とし、大正関東地震（1923 年）の隆起ベンチと考えられる標高約 0.5～1.5m の地形面を T 面とした。同様に荒崎については標高約 1.0～2.0m の地形面を G 面とし、標高約 0～1.0m の地形面を T 面とした。地形面の形態は、スコリア質砂岩が凸部、泥岩が凹部をなし、スコリア質砂岩の層厚が厚いものほど凸部が高い傾向がある。泥岩は地形面の外縁付近では緩く海側へ傾斜し、波浪による侵食を受けている。地形面の外縁から離れたところでは、泥岩が厚いエリアに波浪と風化作用によって形成されたと考えられる平坦面が認められる。平坦面の発達状況は、両地域間で若干の差が認められる（図 2.18 及び図 2.19）。

城ヶ島で 7 地点、荒崎で 5 地点、合計 12 地点で離水生物群集（ヤッコカンザシ類を主体）を採取した。放射性炭素年代測定に供する試料は、試料の未変質部を用いる目的から、酸処理を施すことが通例となっているが、その際の酸処理条件（特に、塩酸による処理濃度）については測定機器、施設ごとに経験的に定められていることが多い。そこで、これらを 15～95%程度の範囲で塩酸処理濃度の違いによって細分し、城ヶ島で 13 試料、荒崎で 17 試料、合計 30 試料を年代測定用試料とした。試料の保存状態はおおむね良好であり、ノッチ、海食洞及び波食溝に沿って分布している。試料の採取標高は城ヶ島で 0.9～1.5m（T 面相当）及び 2.4～2.8m（G 面相当）、荒崎で 0.6～1.3m（T 面相当）である。また、離水生物群集の分布高度には最大約 60cm 程度の幅が認められる。

放射性炭素年代の測定結果は、城ヶ島の T 面相当で約 360～540 yr B.P.、G 面相当で約 560～650 yr B.P.を示し（図 2.20）、荒崎の T 面相当で約 350～550 yr B.P.の年代値を示した（図 2.21）。生物遺骸が形成する石灰質物質は、日本近海の古い海水から作られるため、実際の暦年代はより古くなることが知られている（海洋リザーバ効果）。400 年程度の海洋リザーバ効果¹⁸及び 80 年程度のローカルリザーバ効果¹⁹の除去により若くなることを考慮すると、誤差の範囲内で T 面が大正関東地震（1923 年）、G 面が元禄関東地震（1703 年）にそれぞれ対応すると考えられ、ほぼ現在に近い年代値を示していることから、得られた結果はおおむね妥当と評価できる。

城ヶ島の試料 C01、荒崎の試料 C03 を段階的に溶解させ、放射性炭素年代の測定を行ったところ、酸処理濃度 50～60%程度が最も適切な値を示した（図 2.20 及び図 2.21 の赤字）。これは、地形面の離水後に試料表面で生じた再結晶等の影響が除去された結果、本来の値を示したものと推定される。一方、これらの試料と溶解処理を実施していない試料の年代値とを比較すると、試料によってばらつきが大きい結果となった。

以上から、元禄関東地震及び大正関東地震による離水海岸地形の年代値を得ることができ、海洋リザーバ効果等を考慮すると、この結果は妥当な年代値と評価できる。また、年代測定試料を段階的に溶解させ、放射性炭素年代測定を行ったところ、酸処理濃度 50～60%程度が最も古い値を示した。これは、試料表面で生じた再結晶等の影響が除去された結果、本来の値を示したものと推定され、酸処理濃度の差異による影響を把握できた。

(4) 高知県足摺岬（松尾地区）における地形面の年代測定結果

足摺岬の松尾の海岸付近に露出する地質は中新世の花崗岩類を主体とし、一部にアプライト、ドレライト及び玄武岩の岩脈がみられる。岩脈、断層及び卓越する割れ目の方向は、NNW-SSE で高角度のものが多い。完新世段丘は海岸侵食地形面として認識でき、高位より A1 面～A7 面に区分した（図 2.22）。これらの地形面は、内縁付近では平坦地を伴い、外縁付近では丸みを帯び、海岸へ傾斜している。

放射性炭素年代測定に供する試料は A7 面（標高 1.5～2.2m）及び A6 面（3.8～4.0m）で採取した。採取試料はビーチロックで構成されていたことから、採取試料を貝殻片及び基質部に分け、年代測定試料を 13 試料採取した。また、試料を採取した標高には幅があることから、試料の上端及び下端の標高を記録した。

測定結果を図 2.23 に示す。実際の暦年代は、400 年程度の海洋リザーバ効果¹⁸及び黒潮域における 50～100 年程度のローカルリザーバ効果²⁰の除去により若くなることを考慮する必要があるが、測定結果はそれよりも大きくばらついている。全体的に基質の年代が若く、貝殻片の年代がより古い傾向がある。この理由としては、基質であるビーチロックの再結晶時に、相対的に新しい炭素を取り込んだ可能性が考えられる。また、地形面の形成年代は、貝殻片に着眼すると測定数の多い A7 面で $2,096 \pm 32 \sim 3,762 \pm 28$ yr B.P. の値（標準誤差 1σ 、以下同様）を示した。これは、既往の研究例²¹の $1,700 \pm 60$ yr B.P. とおおむね整合している。

(5) まとめ

以上から、本研究で対象としている年代軸で離水海岸地形の隆起年代を議論する上では、年代測定試料の対象の違いが放射性炭素年代測定の結果に与える影響は無視できないことが分かった。炭酸塩基質（ビーチロック）の年代が、貝殻片の年代より若くなる傾向の理由としては、ビーチロックの形成に伴う再結晶時に、相対的に新しい炭素を取り込んだ可能性が考えられる。離水生物群集遺骸の年代を基質から分離して測定することにより、地形面の形成年代の幅をより狭めることができ、本手法に基づいた完新世段丘の離水年代のもつ不確実さをより低減できると考えられる。

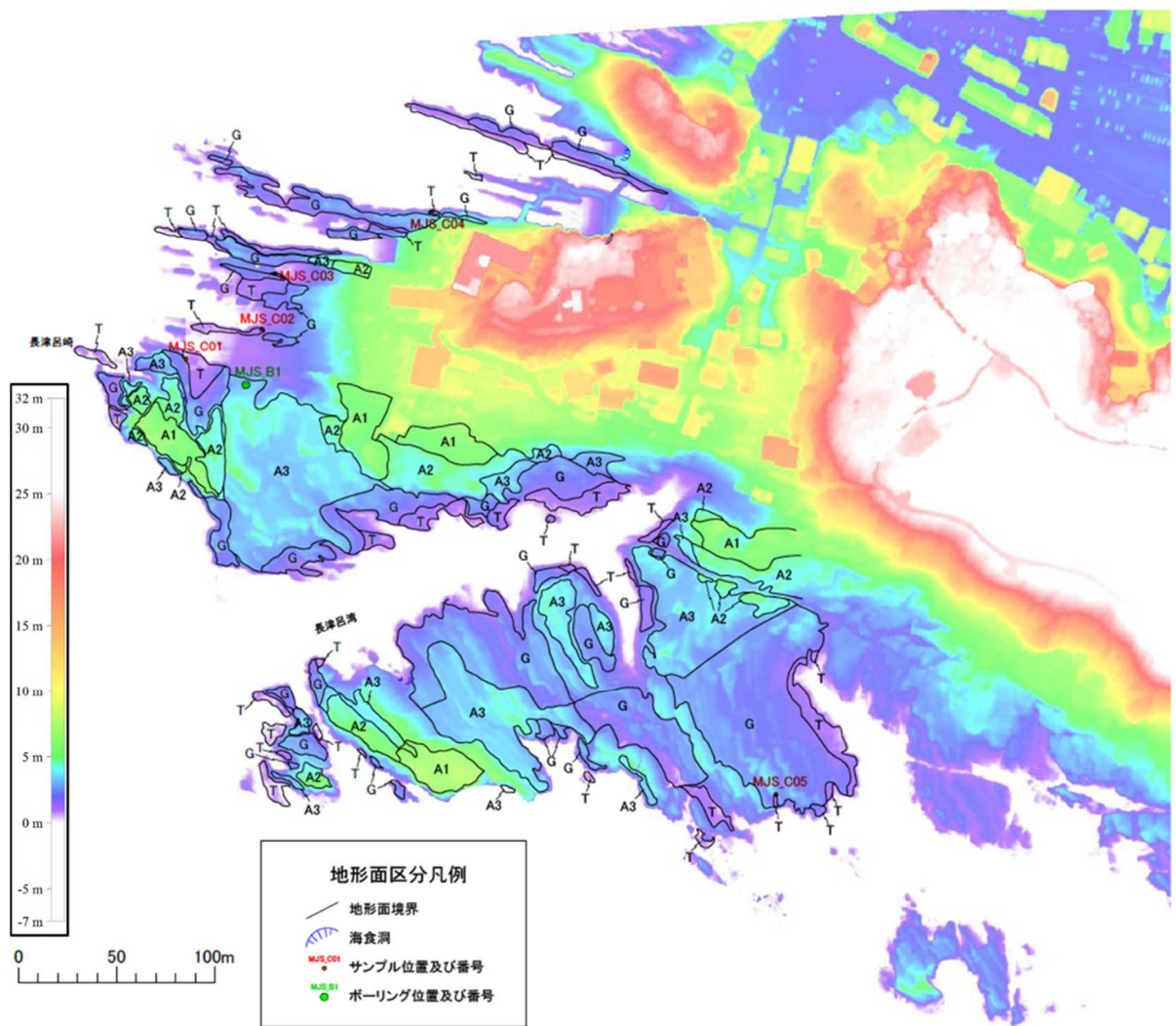


図 2.18 三浦半島城ヶ島の UAV レーザー測量による高度段彩図及び地形面区分
 Fig. 2.18 Gradient tints diagram of digital elevation model using UAV laser and geomorphic surface at Jogashima in Miura Peninsula.

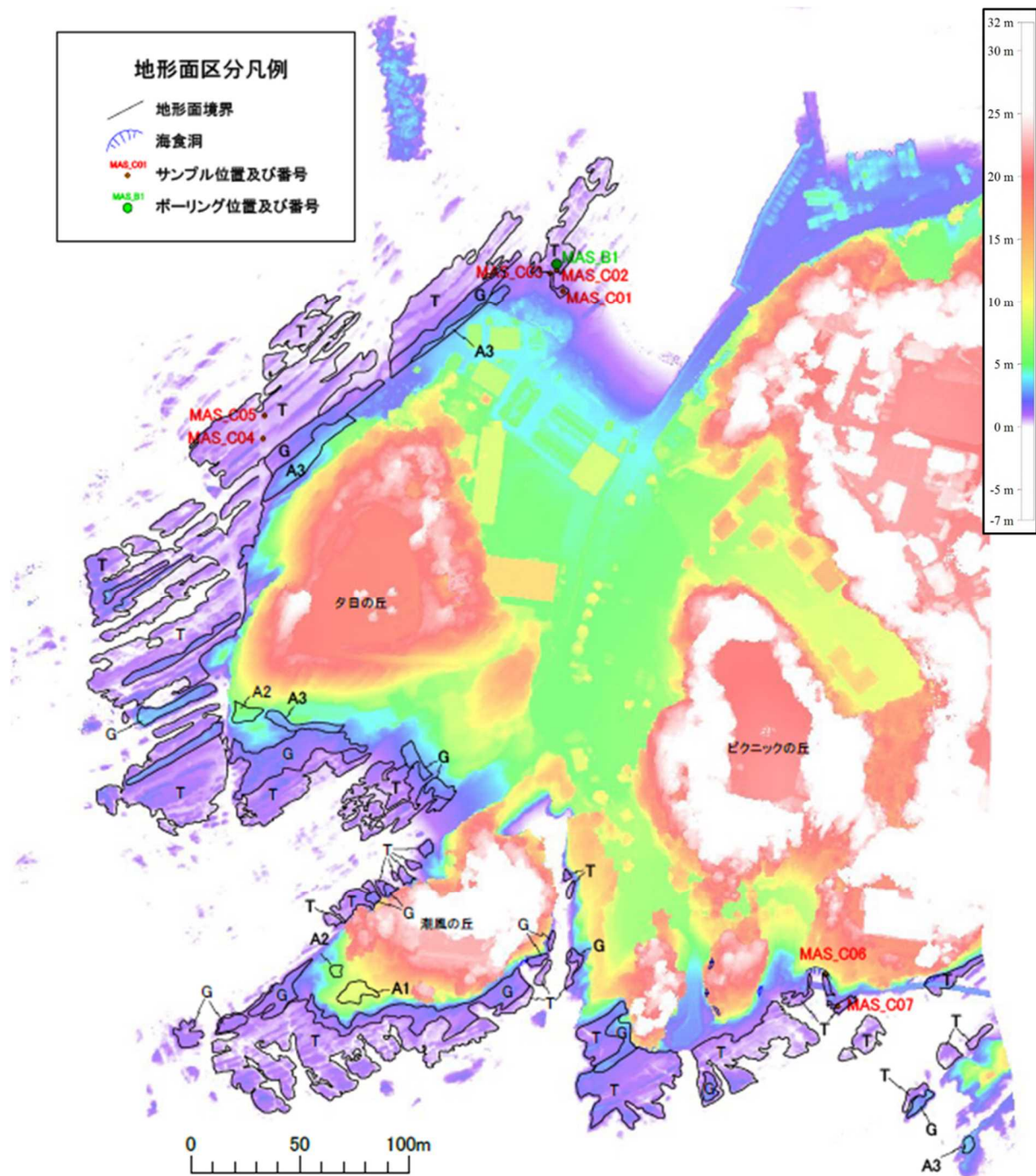
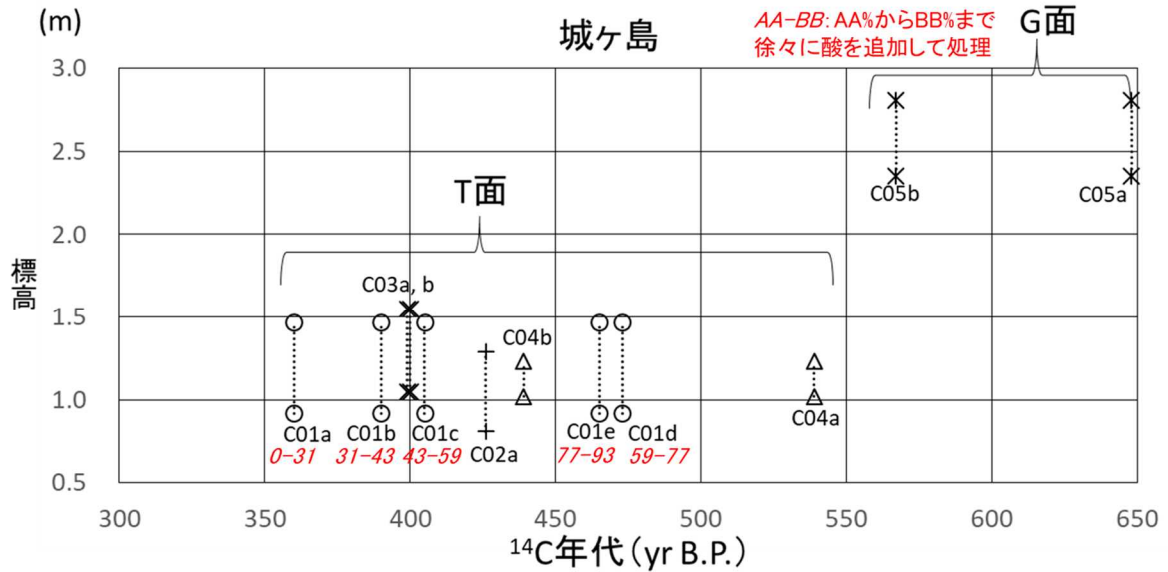


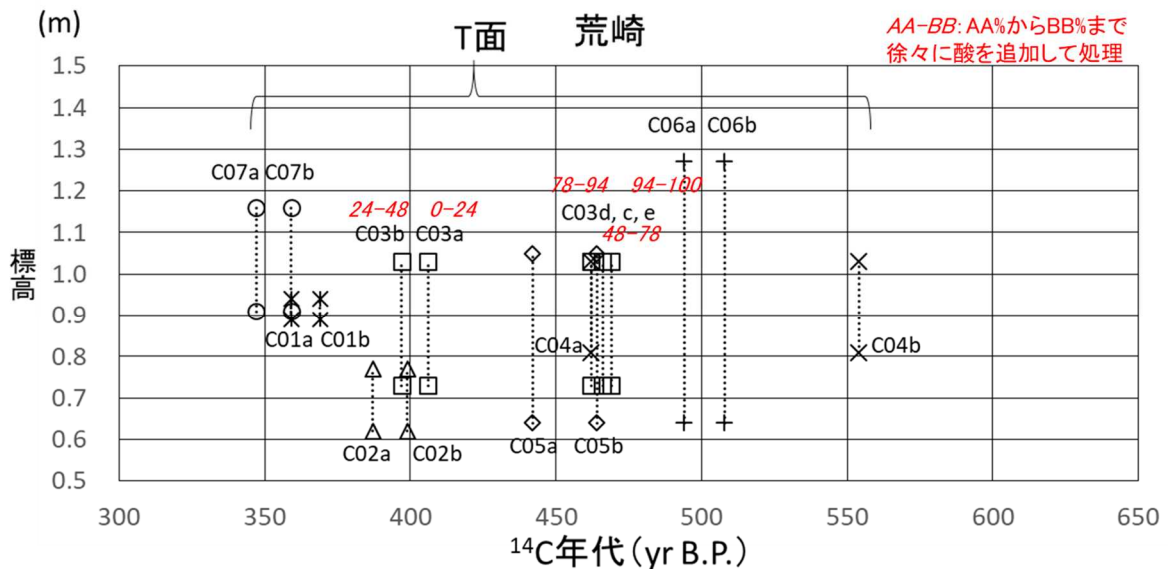
図 2.19 三浦半島荒崎の UAV レーザー測量による高度段彩図及び地形面区分
 Fig. 2.19 Gradient tints diagram of digital elevation model using UAV laser and geomorphic surface at Arasaki in Miura Peninsula.



同一のプロット図柄は同一の測定試料であることを示し、酸処理濃度の違いによって細分している（試料名末尾を酸処理濃度の小さい方から順にa、b、c……とする）。破線は離水生物群集の分布高度の幅を示す。

出典) 内田・佐津川 (2018) ²² を改変

図 2.20 三浦半島城ヶ島に分布する離水生物遺骸群集から得られた放射性炭素年代
 Fig. 2.20 ¹⁴C age from uplifted sessile assemblages at Jogashima in Miura Peninsula.



同一のプロット図柄は同一の測定試料であることを示し、酸処理濃度の違いによって細分している（試料名末尾を酸処理濃度の小さい方から順にa、b、c……とする）。破線は離水生物群集の分布高度の幅を示す。

出典) 内田・佐津川 (2018) ²² を改変

図 2.21 三浦半島荒崎に分布する離水生物遺骸群集から得られた放射性炭素年代
 Fig. 2.21 ¹⁴C age from uplifted sessile assemblages at Arasaki in Miura Peninsula.

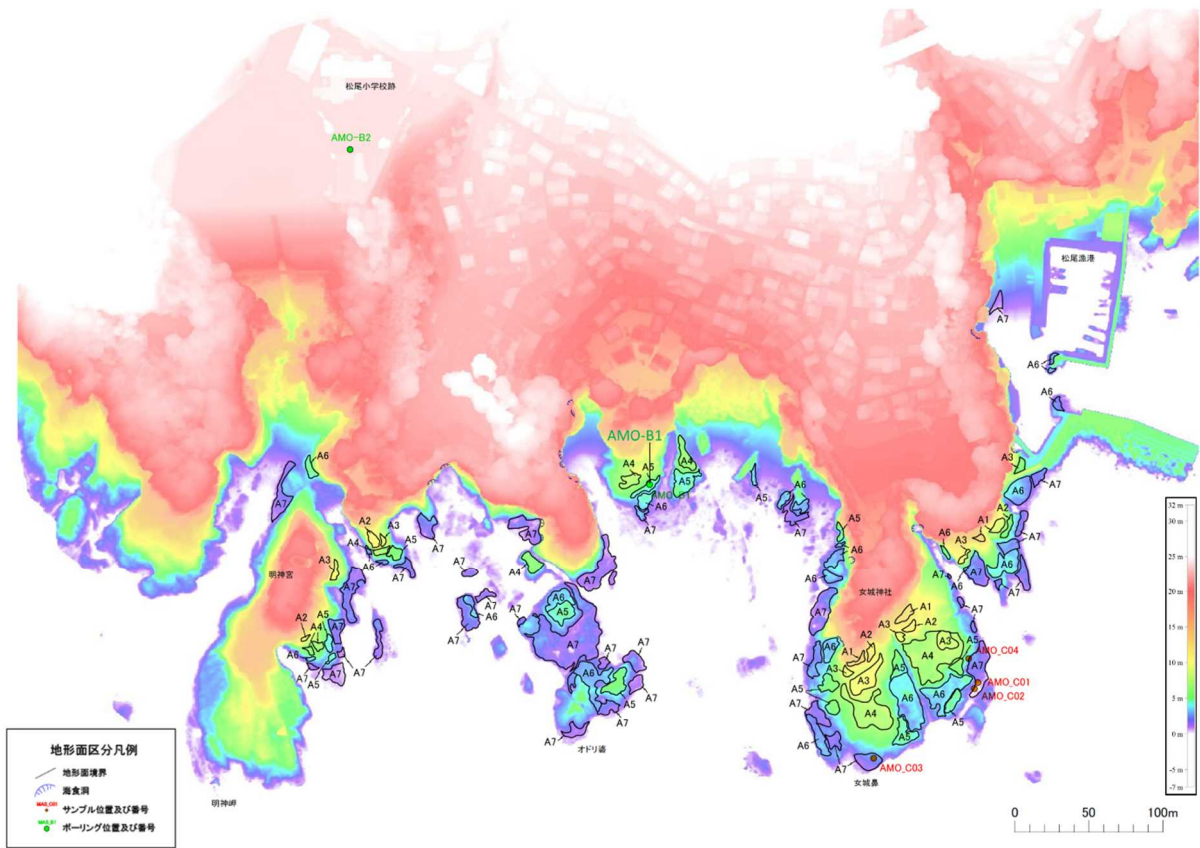
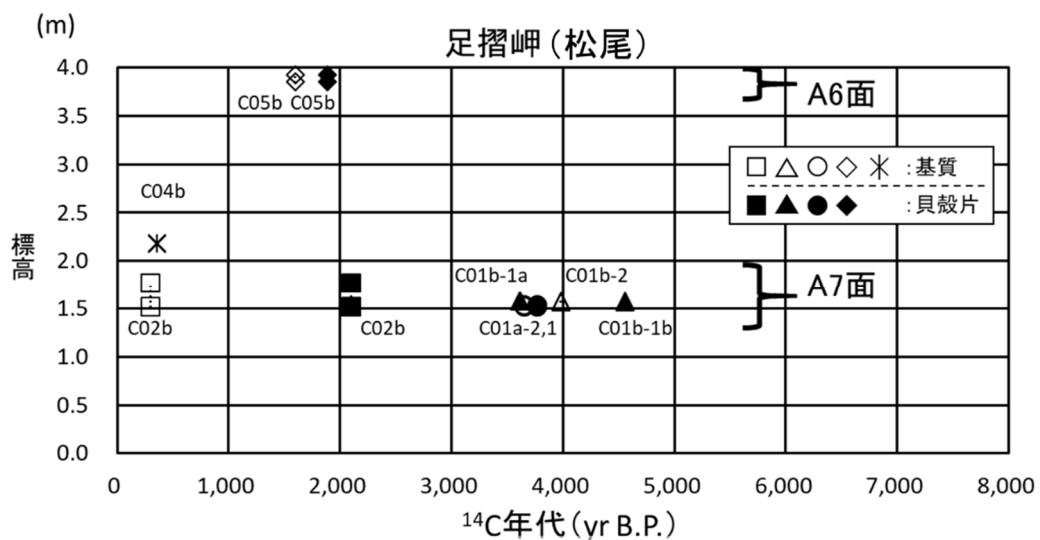


図 2.22 足摺岬松尾の UAV レーザー測量による高度段彩図及び地形面区分
 Fig. 2.22 Gradient tints diagram of digital elevation model using UAV laser and geomorphic surface at Matsuo in Cape Ashizuri.



同一標高にある同じ輪郭をもつシンボルは同一試料から分取した試料であることを表す。

出典) 内田・佐津川 (2019) ²³ を改変

図 2.23 足摺岬松尾に分布する離水生物遺骸群集から得られた放射性炭素年代
 Fig. 2.23 ¹⁴C age from uplifted sessile assemblages at Matsuo in Cape Ashizuri.

2.2.2 宇宙線生成核種による隆起年代評価手法の整備

(1) はじめに

2.2.1 では、プレート間地震のうち活動間隔が長い地震の活動履歴を評価する方法として、沿岸隆起に起因する離水海岸地形及びそれに付随する離水生物群集を認定する方法の適用性並びに隆起年代を評価する際の結果のばらつき(酸処理濃度及び測定試料の対象の違い)を検討した。その結果、実際の地震による離水海岸地形の年代値を得ることができたこと、また、酸処理濃度の差異及び年代測定試料の対象の違いが、放射性炭素年代測定の結果に与える影響を把握できた。

しかしながら、この方法で必要となる離水生物群集は高緯度の地域では化石として保存されにくい。これは、離水生物群集の主要成分である炭酸カルシウムが、海水温が低いために炭酸イオンに乏しい高緯度の海水と長期間にわたって触れ合うことで溶解するためと考えられる²⁴。この他にも様々な要因で離水生物群集が保存されない、あるいは最初から形成されないケースが想定されるため、技術的な限界から放射性炭素年代測定による隆起年代の評価が適用できない海域も多い。そこで、本研究では離水生物群集を必要としない宇宙線生成核種を利用した隆起年代評価手法を検討した。

宇宙線生成核種 (Terrestrial Cosmogenic Nuclides, TCN) とは、宇宙線 (一次宇宙線) が大気に飛び込んだ際に生じる中性子、ミュオン等の高エネルギー粒子 (二次宇宙線。以下「宇宙線」という。) が地球表層の岩石中に照射される際の相互作用によって生成する核種をいう²⁵。岩石中の宇宙線生成核種の蓄積量を測定することにより、岩石が地表に露出して宇宙線に被曝される環境に置かれてからの時間、換言すれば岩石が地表に露出する原因となった地震、気候変動等の地質学的イベントの年代を定量的に評価することが可能となる²⁶。

隆起年代の評価においては、地震等の地質学イベントにより海面下の波食棚 (ベンチ) が離水した年代が隆起年代ということになる。宇宙線は水中では強度が大きく減衰するため²⁷、隆起年代はベンチが離水することにより宇宙線生成核種の蓄積が始まった年代 (表面照射年代) と等しいとみなすことができる。したがって、隆起ベンチを構成する岩石中の宇宙線生成核種の蓄積量を測定することにより、離水生物群集を欠いた地域であっても隆起年代の評価が可能であると考えられる。さらに長半減期の宇宙線生成核種を用いれば放射性炭素年代測定法では測定できない古い年代値を示す地域における年代測定も可能になると考えられる。

ただし、実際の隆起ベンチは風化・侵食作用により表層が削剥されていると考えられる。したがって宇宙線照射面が変化することから、岩石に照射される宇宙線フラックスが一定ではなくなるため、求められる隆起年代は不確実性を伴うことが予想される²⁸。さらに宇宙線生成核種は自然界における存在度が極めて低い核種であり、その分析精度も課題となる。そこで本研究では、宇宙線生成核種を用いた年代評価の不確実性の要因を分析すると

ともに本手法による評価上の留意点を整理し、隆起年代評価への適用可能性を検討することとした。

なお、本研究は国立大学法人東京大学大気海洋研究所に委託し、実施したものである。

(2) 対象地域

地球表層プロセスの議論に広く用いられる重要な宇宙線生成核種は ^{10}Be 及び ^{26}Al である。地球の地殻中の主要な元素は酸素 (46 wt%) 及びケイ素 (27 wt%) であるが、 ^{10}Be 及び ^{26}Al は、宇宙線が酸素及びケイ素に照射された際の相互作用で生成される核種である。特に、酸素及びケイ素で構成される鉱物である石英 (SiO_2) は、地球表層に比較的広く存在しており、 ^{10}Be 及び ^{26}Al の測定に有用であることから地球表層プロセスの研究に広く用いられている²⁸ (図 2.24)。

したがって、宇宙線生成核種を利用した隆起年代評価手法を検討するに当たり対象となる地域は、石英の含有量が多い花崗岩等の岩石が露出する地域であることが望ましい。さらに、年代値のクロスチェックの観点から、離水生物群集遺骸が豊富に産出し、放射性炭素年代測定による隆起年代の評価が可能であることも条件となる。そこで、本研究では 2.2.1 において示した足摺岬松尾を対象とし、オールコアボーリング及びハンドサンプリングにより深度ごとの試料を採取した。今回は 2.2.1 における足摺岬の A5 面 (標高 5m、図 2.22 における AMO-B1 地点) で採取したボーリングコア試料 (AMO-B1c : 図 2.25) について採取深度ごとに ^{10}Be 濃集量の測定を行った。

なお、足摺岬の A5 面は既往研究である前杓 (1988)²¹ におけるベンチ高度集中帯レベル I に対応していると考えられる。レベル I が隆起した年代は足摺岬周辺地域 (高知県黒潮町及び土佐清水市片粕) において対比される旧海水準の放射性炭素年代から 4,800~2,730 yr B.P.と推定されている²¹。

(3) 分析手法

自然界における存在度がきわめて低い宇宙線生成核種を検出する必要があることから、本研究では宇宙線生成核種 (^{10}Be) の測定に超高感度の質量分析計である東京大学タンデム加速器研究施設の加速器質量分析計 (Acceleration Mass Spectrometry (以下「AMS」という。)) を用いた。

また、足摺岬の隆起ベンチは 2.2.1 で述べたとおり数千年前に離水したと考えられ、 ^{10}Be の濃集量が低いことが予想されることから、AMS で測定した際のバックグラウンドを低く抑える必要がある。バックグラウンドが高くなる要因として、Be 標準溶液に含まれるホウ素含有量が挙げられる。そこで本研究では、ホウ素が少なく純度の高い Be 標準溶液を使用しバックグラウンド値を下げることで、 ^{10}Be 低濃度試料の分析を試みた。

宇宙線は地中で指数関数的に減衰するため、地中の核種濃集量の深度分布も地表から地下に向かって指数関数的に減少する（図 2.26）。したがってデータ解析に際しては、地下の試料から得られた濃集量の深度分布（観測値）と、2.2.2.1 式によって記述される理論値²⁹とを比較し、観測値を最もよく説明できる各種のパラメータの値を解析的に定める。

$$\begin{aligned}
 N = N_0 e^{-\lambda t} &+ \frac{P_{spal}}{\lambda + \mu_{spal} \varepsilon} e^{-\mu_{spal} x} \left(1 - e^{-(\lambda + \mu_{spal} \varepsilon) t} \right) \\
 &+ \frac{P_{slow}}{\lambda + \mu_{slow} \varepsilon} e^{-\mu_{slow} x} \left(1 - e^{-(\lambda + \mu_{slow} \varepsilon) t} \right) \\
 &+ \frac{P_{fast}}{\lambda + \mu_{fast} \varepsilon} e^{-\mu_{fast} x} \left(1 - e^{-(\lambda + \mu_{fast} \varepsilon) t} \right) \quad \dots\dots\dots (2.2.2.1)
 \end{aligned}$$

このとき、 N は核種濃集量、 N_0 は岩石中に元々含まれていた核種濃集量（インヘリタンス）、 t は表面照射年代、 ε は表層の侵食速度、 λ は核種の壊変定数、 x は核種が生成する地表からの深さ（すなわち試料を採取した深度）、 P_{spal} 、 P_{slow} 、 P_{fast} はそれぞれ中性子、slow muon、fast muon の寄与による地表面における核種生成速度、 μ_{spal} 、 μ_{slow} 、 μ_{fast} は岩石の密度とそれぞれの宇宙線の平均減衰長の比を表す。ここで、未知数となるのはインヘリタンス、侵食速度及び表面照射年代である。前述のとおり風化・侵食作用により表層が削剥されている場合、表面照射年代及び侵食速度が互いにトレード・オフの関係にあるため、尤度が最大となる表面照射年代及び侵食速度は一意に求められない。そこで本研究では、マルコフ連鎖モンテカルロ法（Markov Chain Monte Carlo（以下「MCMC 法」という。))を用いた解析を行い、表面照射年代及びその誤差範囲を統計的に求めた。MCMC 法は、与えられた確率分布からのサンプリングにより解析的にパラメータの事後分布を推定するに当たり、マルコフ連鎖に基づく効率的なサンプリングを行うことで多変量の確率分布に対応したパラメータ推定法である（図 2.26）。

(4) 検討結果

AMS で測定した AMO-B1c の ^{10}Be 濃集量の深度プロファイルを図 2.27 に示した。深度プロファイルはおおむね地表から深部に向かって減衰する傾向を示している。これは ^{10}Be が低濃度の試料であっても、宇宙線の照射により生成された ^{10}Be を AMS による測定によって有意に検出できたことを示している。核種濃集量はおおむね 5,000~6,000 atoms/g の誤差を示すが、約 9,000 atoms/g という大きい誤差を示す試料もみられる。これは、他の採取深度の試料よりも、溶解した石英量が少なかったためと考えられる。

データの解析に当たって、未知数であるインヘリタンス、侵食速度及び表面照射年代のとり得る値を制約する必要がある。核種濃集量は地表面から地下に向かって指数関数的に

減衰するため、インヘリタンスは測定された核種濃集量の最大値を超えることはない。したがってインヘリタンスは 0~30,000 atoms/g に収まると判断される (図 2.26)。侵食速度については、試料採取地点では未風化の花崗岩が露出していることから、風化層が侵食により失われていることが示唆される。したがって、ここでは花崗岩の風化速度を採取地点における侵食速度とみなす。花崗岩の風化速度については、墓石及び石壁の剥落から 15 mm/kyr という値が推定されている³⁰。そこで、採取地点における風化速度はそれと同じか、数倍程度と仮定し、15±15 mm/kyr の正規分布を与えた場合をケース 1 として解析を行った。一方、日本国内の山地における花崗岩の侵食速度としては、隆起準平原である阿武隈高原において 50 mm/kyr を超える値が得られている^{31, 32, 33}。ここでは、0~50 mm/kyr の範囲を一様に取り得ると仮定した場合をケース 2 として解析を行った。最後に表面照射年代については、試料を採取した A5 面より下位の A7 面では 2.2.1 で述べたとおり放射性炭素年代測定により 2,096±32~3,762±28 yr B.P.の値が得られていることを考慮し、十分な幅を取って 0~2 万年の年代を一様に取り得るという条件で解析を行った。

解析の結果、ケース 1 の場合は約 4,600 -2,600/+4,500 年、ケース 2 の場合は約 4,700 -2,700/+5,900 年の表面照射年代が得られた。いずれの場合も誤差は大きいものの、得られた最頻値は既往研究で推定されている隆起年代 (4,800~2,730 yr B.P.)²¹ と調和的であり、また 2.2.1 で得られた下位の隆起ベンチの放射性炭素年代とも矛盾しない。

なお、得られた宇宙線照射年代に生じた誤差の要因としては、1) 測定誤差が大きい点、2) 侵食速度が十分に制約できていない点が挙げられる。1) については、岩石の採取量を増やし測定に用いる石英の量を増やすとともに、分析手法の更なる改良によって検出できる ¹⁰Be の量を増加させることができれば改善が可能であると考えられる。2) については、より厳密な侵食速度の制約が必要である。そのための手法として、Shiroya et al. (2010)³¹ 及び Nakamura et al. (2014)³² で報告されているような深度プロファイルによる侵食速度の解析が有効であると考えられる。

(5) まとめ

以上から、放射性炭素年代測定に必要な離水生物群集を欠いた隆起海岸地形においても、宇宙線生成核種を用いることで隆起年代を評価できる可能性を示した。また、従来宇宙線生成核種の検出が困難とされてきた比較的若い隆起ベンチの岩石においても、測定の際のバックグラウンドを低減することによって、宇宙線照射により生成した核種を検出できることを示した。

一方で宇宙線生成核種を用いた隆起年代評価における不確実性の要因として、核種濃集量の測定誤差及び侵食速度の制約が挙げられる。前者についてはサンプル量の増加及び分析手法の改良、後者については深度プロファイルによる侵食速度の解析により不確実性を低減できると考えられる。

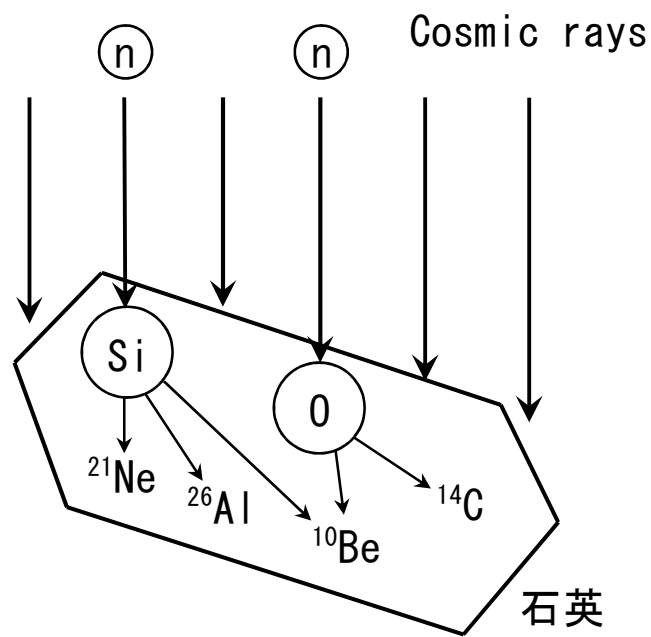


図 2.24 石英中における宇宙線生成核種の生成

Fig. 2.24 Schematic diagram of the production of cosmogenic nuclides in a quartz crystal.

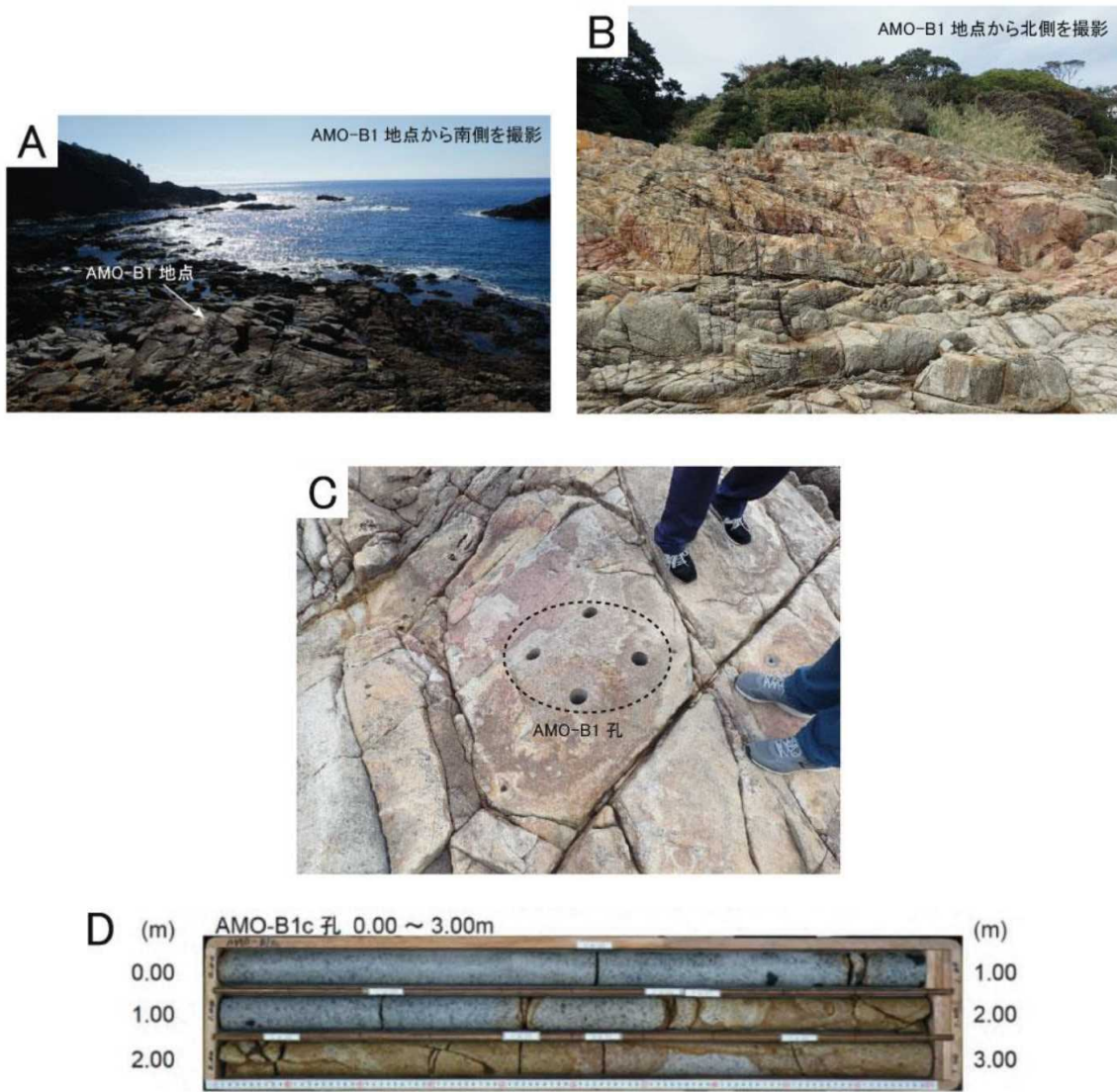
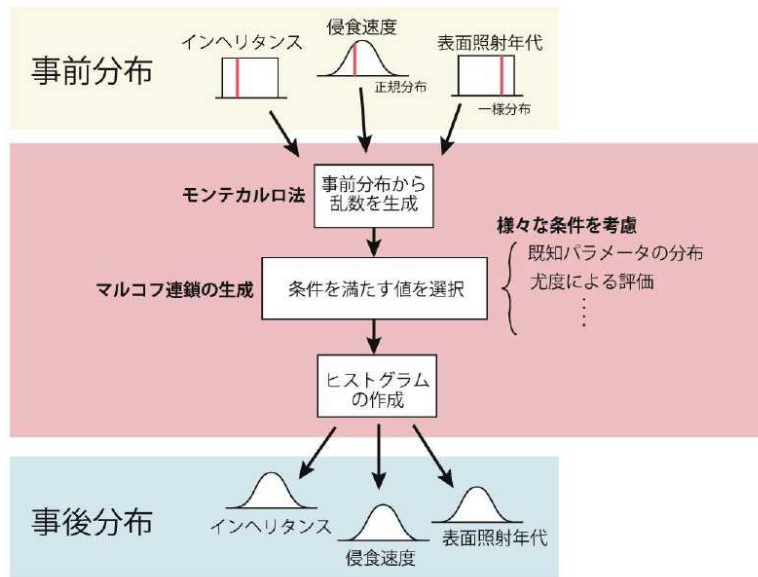


図 2.25 試料採取地点及びボーリングコアの様子

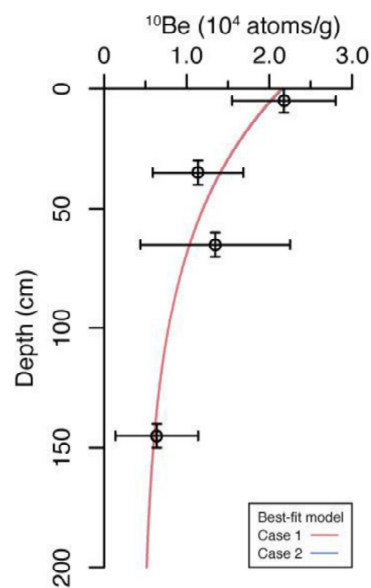
Fig. 2.25 Sampling site at AMO-B1 of Cape Ashizuri and overall view of the sample taken from the AMO-B1c borehole.



出典) 東京大学(2019)³⁴を改変

図 2.26 MCMC 法の概要

Fig. 2.26 Schematic model of MCMC methods.



出典) 東京大学(2019)³⁴から抜粋

図 2.27 ^{10}Be 濃集量の深度プロファイル

Fig. 2.27 Depth profile of production rate of cosmogenic ^{10}Be in quartz.

注) ケース 1 及びケース 2 の解析条件で得られた近似曲線をそれぞれ赤線及び青線で示しているが、両者ともほとんど一致するため青線はほぼ見えていない。

3. 結論

3.1 成果の要点

地震の活動履歴評価の精度向上の観点から、微化石、火山灰等の各種ツールを用いて、古地震及び隆起年代を評価する手法に関する技術的知見を収集し、地震の履歴に関する評価手法に反映するための研究を実施した。各研究実施項目において、以下の成果を得た。

(1) 活断層に起因する内陸地殻内地震の履歴に関する評価手法の整備

①浅海域における古地震履歴評価手法の整備

海域における内陸地殻内地震の活動履歴を評価する方法の一つとして、断層を挟んだ2点間の柱状採泥調査等により、特徴的な堆積物の変位及び厚さの変化を明らかにし、断層の活動した時期を推定する方法が挙げられる。本研究では、断層を挟んだ2点間の柱状採泥調査によって得られた試料に対し完新統（完新世の地層）を対象に帯磁率測定及び微化石分析を実施し、断層変位指標としての適用性を検討した。その結果、複数の微化石イベントが認定でき、それらイベント及び帯磁率の変化パターンを用いて複数の層準を対比することができた。この対比に基づくと、2点間の層厚の差異は地震時の隆起・沈降の傾向を反映していると考えることができ、通常用いられている帯磁率測定及び微化石分析が、完新統のコアを対象にした地震履歴の抽出に有用であることを示した。

②イベント堆積物を用いた古地震履歴評価手法の整備

調査の制限を受けるような海域又は堆積物の堆積状況が悪い海域では、上記①の手法が適用できない場合がある。そのような場合には、より間接的ではあるが、評価対象の断層近傍で柱状試料を採取し、地震時に浅部から供給されたイベント堆積物（主に砂質堆積物）から地震性堆積物を識別しその年代を見積もることにより、これらのデータを地震履歴の情報として利用する方法が挙げられる。本研究では、断層近傍で実施された柱状採泥調査によって得られた試料に対し完新統を対象に帯磁率測定及び微化石分析を実施し、イベント堆積物を対比する上でのこれらの分析の適用性を検討した。解析結果から、放射性炭素年代測定値が得られている層準が限られていても、帯磁率変化のピーク対比と花粉群集変化とを組み合わせることで、近傍コアとの対比面を多く得られる可能性があることを示した。

③火山灰層序学的年代評価手法の整備

「敷地内及び敷地周辺の地質・地質構造調査に係る審査ガイド」で示されている中期更新世以降に対応した火山灰層序学的年代評価手法を整備するため、深海底堆積物（ちきゅう C9001C コア）及び陸域堆積物に含まれる火山灰（テフラ）の対比を検討した。深海底堆積物を用いてテフラ年代を高精度に決定するとともに、風化に抵抗性のある鉱物の化学組成を指標にして、深海底堆積物中のテフラと陸成堆積物中のテフラとを対比

することができた。これにより、海域及び陸域において信頼性の高いテフラ年代を共有することが可能となり、断層変位指標である海成段丘の年代妥当性評価に活用できる見通しを得た。

(2) プレート間地震の履歴に関する評価手法の整備

①放射線炭素年代測定による隆起年代評価手法の整備

離水海岸地形の隆起年代を評価する際の結果のばらつき（酸処理濃度及び測定試料の対象の違い）を把握するため、すでに隆起したことが明らかな地域において離水海岸地形を認定し、高度分布及びその地形面が形成された年代を検討した。その結果、既知の地震による離水海岸地形の妥当な年代値を得ることができた。さらに、年代測定試料を段階的に溶解させることにより、酸処理濃度の差異による影響を把握できた。また、年代測定試料の対象の違いが放射線炭素年代測定の結果に与える影響は無視できないことが分かった。

②宇宙線生成核種による隆起年代評価手法の整備

宇宙線生成核種を用いた隆起年代評価の不確実性の要因を分析するとともに本手法による評価上の留意点を整理し、隆起年代評価への適用可能性を検討した。その結果、放射線炭素年代測定に必要な離水生物群集を欠いた隆起海岸地形においても、宇宙線生成核種を用いることで離水年代を推定し、隆起年代評価に適用できる可能性を示した。また、数千年前に形成された比較的若い隆起ベンチにおいても、測定の際のバックグラウンドを低減することによって、宇宙線照射により生成した核種を検出できることを示した。

内陸地殻内地震及びプレート間地震の履歴評価に向けて、コア間の対比精度を高めること及び信頼性の高いテフラ年代を得ることができた。それにより、断層変位指標の検出及びイベント堆積物の対比が可能となり、また海成段丘の信頼性の高い年代評価を実施できる見通しを得た。離水海岸地形の年代評価については、従来手法による結果のばらつきを把握でき、先駆的な宇宙線生成核種を適用できる見通しを得た。

3.2 目的の達成状況及び成果の活用等

(1) 活断層に起因する内陸地殻内地震の履歴に関する評価手法の整備

上記のとおり平成 29 年度から令和元年度までの実施期間の目的を全て達成した。研究成果の活用としては、以下の原子力規制委員会の新規制基準適合性に係る審査会合において火山灰層序学的年代評価手法の整備に係る研究成果（Matsu'ura et al., 2014、

Matsu'ura and Sugaya, 2017) が引用され、隆起の状況を検討するための根拠として活用された。

- ・原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合（第 526 回会合）、平成 29 年 11 月開催

このほか、以下の原子力規制委員会の新規制基準適合性に係る審査会合においても研究成果（Matsu'ura and Komatsubara, 2017）が引用されている。

- ・原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合（第 549 回会合）、平成 30 年 2 月開催
- ・原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合（第 579 回会合）、平成 30 年 6 月開催

(2) プレート間地震の履歴に関する評価手法の整備

上記のとおり平成 29 年度から令和元年度までの実施期間の目的を全て達成した。放射性炭素年代測定による隆起年代評価手法の整備に関しては、地形面と年代測定結果との相互関係を精査し、暦年代への変換を行い、その結果から得られた成果について論文として公表する予定であり、今後の適合性審査において活用が期待される。

参考文献一覧

- 1 文部科学省研究開発局、国立大学法人九州大学、“平成 28 年熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査 平成 28~30 年度 成果報告書”、873p、2019.
- 2 文部科学省研究開発局、独立行政法人防災科学技術研究所、“科学技術振興費 ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究 平成 24 年度 成果報告書”、532p、2013.
- 3 国立大学法人東京大学、“平成 31 年度原子力施設等防災対策等委託費（海域における地震発生履歴評価のための指標に関する検討）事業 報告書”、2020.
- 4 国土地理院、“電子地形図”、
<http://maps.gsi.go.jp/#12/33.310590/131.594238/&base=std&ls=std&disp=1&vs=c1j0h0k0l0u0t0z0r0s0m0f1&d=v> (2020 年 1 月 6 日確認)
- 5 地震調査研究推進本部地震調査委員会、“中央構造線断層帯（金剛山地東縁一由布院）の長期評価（第二版）”、162p、2017.
- 6 Kuwae, M., Yamamoto, M., Ikehara, K., Irino, T., Takemura, K., Sagawa, T., Sakamoto, T., Ikehara, M. and Takeoka, H., “Stratigraphy and wiggle-matching-based age-depth model of late Holocene marine sediments in Beppu Bay, southwest Japan”, *Journal of Asian Earth Sciences*, 69, 133-148, 2013.
- 7 嶋田美咲、高原光、原口強、池原研、池原実、加三千宣、村山雅史、竹村恵二、山田圭太郎、山本正伸、“別府湾海底堆積物の花粉分析に基づく過去 7000 年間の植生変遷”、第 30 回日本植生史学会講演要旨、P-3、2015.
- 8 Matsu'ura, T., Kimura, H., Komatsubara, J., Goto, N., Yanagida, M., Ichikawa, K. and Furusawa, A., “Late Quaternary uplift rate inferred from marine terraces, Shimokita Peninsula, northeastern Japan: a preliminary investigation of the buried shoreline angle”, *Geomorphology*, 209, 1-17, 2014.
- 9 Matsu'ura, T., Furusawa, A., Shimogama, K., Goto, N. and Komatsubara, J., “Late Quaternary tephrostratigraphy and cryptotephrostratigraphy of deep-sea sequences (Chikyu C9001C cores) as tools for marine terrace chronology in NE Japan”, *Quaternary Geochronology*, 23, 63-79, 2014.
- 10 Matsu'ura, T., Kimura, J.-I., Chang, Q. and Komatsubara, J., “Using tephrostratigraphy and cryptotephrostratigraphy to re-evaluate and improve the Middle Pleistocene age model for marine sequences in northeast Japan (Chikyu C9001C) ”, *Quaternary Geochronology*, 40, 129-145, 2017.
- 11 桑原拓一郎、山崎晴雄、“テフラから見た最近 45 万年間の恐山火山の噴火活動史”、火山、2、37-52、2001.
- 12 桑原拓一郎、“下北半島北部に分布する正津川軽石流堆積物のジルコン・フィッシュョン・トラック年代”、地質学雑誌、112、294-297、2006.

- 13 桑原拓一郎、“青森県、下北半島北部の田名部 A テフラのジルコン・フィッシュン・トラック年代”、第四紀研究、55、45-48、2012.
- 14 Domitsu, H., Uchida, J., Ogane, K., Dobuchi, N., Sato, T., Ikehara, M., Nishi, H., Hasegawa, S. and Oda, M., “Stratigraphic relationship between the last occurrence of *Neogloboquadrina inglei* and marine isotope stages in the northwest Pacific, D/V Chikyu expedition 902, hole C9001C”, Newsletters on Stratigraphy, 44, 113-122, 2011.
- 15 Matsu'ura, T., and Komatsubara, J., “Use of amphibole chemistry for detecting tephtras in deep-sea sequences (Chikyu C9001C cores) and developing a middle Pleistocene tephrochronology for NE Japan”, Quaternary International, 456, 163-179, 2017.
- 16 Lisiecki, L.E., Raymo, M.E., “A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records”, Paleceanography, 20, PA1003, 2005.
- 17 宍倉正展、越後智雄、“1703 年元禄関東地震に伴う三浦半島南部の地殻上下変動-離水波食棚・生物遺骸の高度分布からみた検討-”、歴史地震、no.17、2001.
- 18 Alves, E. Q., Kita, M., Philippa, A. and Christopher, B. R., “The Worldwide Marine Radiocarbon Reservoir Effect: Definitions, Mechanisms, and Prospects”, Reviews of Geophysics, 56, 278-305, 2018.
- 19 宍倉正展、越後智雄、金田平太郎、“歴史地震で隆起した貝化石を用いた三浦半島南部における海洋リザーバー効果の評価”、P066、日本第四紀学会講演要旨集、2006.
- 20 Hirabayashi, S., Yokoyama, Y., Suzuki, A., Miyairi, Y. and Aze, T., “Short-term fluctuations in regional radiocarbon reservoir age recorded in coral skeletons from the Ryukyu Islands in the north-western Pacific”, Journal of Quaternary Science, 32, 1-6, 2017.
- 21 前杢英明、“足摺岬周辺の離水波食地形と完新世地殻変動”、地理科学、43、231-240、1988.
- 22 内田淳一、佐津川貴子、“三浦半島城ヶ島及び荒崎に分布する離水生物遺骸群集から得られた放射性炭素年代の特徴”、日本活断層学会 2018 年度秋季学術大会 講演予稿集、P-23、2018.
- 23 内田淳一、佐津川貴子、“足摺岬及び屋久島に分布する離水生物遺骸群集から得られた放射性炭素年代の特徴”、日本活断層学会 2019 年度秋季学術大会 講演予稿集、P-9、2019.
- 24 Jiang, L.-Q., Feely, R. A., Carter, B. R., Greeley, D. J., Gledhill, D. K. and Arzayus, K. M., “Climatological distribution of aragonite saturation state in the global oceans”, Global Biogeochemical Cycles, 29, 1656-1673, 2015.
- 25 Lal, D., “Cosmic ray labeling of erosion surface: in situ nuclide production rates and erosion models”, Earth and Planetary Science Letters, 104, 424-439, 1991.

- 26 横山祐典、“氷期－間氷期スケールおよび Millennial スケールの気候変動の研究：同位体地球化学・地球物理学的手法によるアプローチ”、地球化学、38、127-150、2004.
- 27 Gosse, J. C. and Phillips, F. M., “Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application”, *Quaternary Science Reviews*, 20, 1475-1560, 2001.
- 28 横山祐典、阿瀬貴博、村澤晃、松崎浩之、“宇宙線照射生成核種を用いた地球表層プロセスの研究”、地質学雑誌、111、693-700、2005.
- 29 松四雄騎、若狭幸、松崎浩之、松倉公憲、“宇宙線生成核種 ^{10}Be および ^{26}Al のプロセス地形学的応用”、地形、28、87-107、2007.
- 30 松倉公憲、“斜面を構成する岩石・岩盤の風化速度”、応用地質、38、224-231、2007.
- 31 Shiroya, K., Yokoyama, Y. and Matsuzaki, H., “Quantitative determination of long-term erosion rates of weathered granitic soil surfaces in western Abukuma, Japan using cosmogenic ^{10}Be and ^{26}Al depth profile”, *Geochemical journal*, 44, e23-e27, 2010.
- 32 Nakamura, A., Yokoyama, Y., Shiroya, K., Miyairi, Y. and Matsuzaki, H., “Direct comparison of site-specific and basin-scale denudation rate estimation by in situ cosmogenic nuclides: an example from the Abukuma Mountains, Japan”, *Progress in Earth and Planetary Science*, 1, 9, 2014.
- 33 Regalla, C., Kirby, E., Fisher, D. and Bierman, P., “Active forearc shortening in Tohoku, Japan: Constraints on fault geometry from erosion rates and fluvial longitudinal profiles”, *Geomorphology*, 195, 84-98, 2013.
- 34 国立大学法人東京大学、“平成 30 年度原子力施設等防災対策等委託費（宇宙線生成核種を用いた隆起海岸地形の離水年代評価に関する検討）事業 報告書”、2019.

執筆者一覧

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ 地震・津波研究部門

内田 淳一 主任技術研究調査官

松浦 旅人 技術研究調査官

佐津川 貴子 技術研究調査官

佐藤 勇輝 技術研究調査官