

RREP-2018-4001

# 安全研究成果報告

## 震源断層評価技術の整備

Development of Methods for Seismic Fault Assessment

内田 淳一、儘田 豊、松浦 旅人、藤田 雅俊、  
菅谷 勝則

Jun'ichi UCHIDA, Yutaka MAMADA, Tabito MATSU'URA, Masatoshi FUJITA, and  
Katsunori SUGAYA

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)

平成 30 年 11 月

November 2018

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。

本レポート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

# 震源断層評価技術の整備

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 儘田 豊

松浦 旅人 藤田 雅俊 菅谷 勝則

## 要 旨

新規制基準及び「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」では「将来活動する可能性のある断層等」について、「その認定に当たって、後期更新世の複数の地形面又は連続的な地層が欠如する等、後期更新世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。」とされている。また、「実用発電用原子炉の安全性向上評価に関する運用ガイド」では「外部事象に係る確率論的リスク評価（PRA）」の活用が挙げられている。これらの評価にあたっては、火山灰層序の構築、活断層のセグメント区分とその連動性の不確かさの評価手順の構築、震源断層モデルの不確かさを評価するためのロジックツリーにおける分岐の適切な設定法の整理等を進めることが重要である。

本プロジェクトでは、上記の背景を踏まえて平成 25 年度から平成 28 年度にかけて、以下の研究課題（①～⑤）に取り組んだ。

### ①火山灰層序学的年代評価手法の整備（平成 25～28 年度）

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。そこで、新規制基準に対応する約 40 万年前以降の年代評価に関する知見を蓄積するため、海洋酸素同位体比曲線が明らかにされており、長期間（安定した堆積層）かつ高い時間分解能を有する深海底堆積物（ちきゅう C9001C コア）を対象に、火山灰（テフラ）の検出及び年代決定に関する手順、並びに手法を取りまとめた。平成 25 年度から平成 26 年度には、深海堆積物中のテフラの検出及び試料を採取し、テフラに含まれる粒子の化学組成データを

蓄積してテフラの識別及び特徴化を行った。平成 27 年度から平成 28 年度には、海洋酸素同位体比曲線を参照したテフラの噴出年代の決定及び手法を取りまとめた。

#### ②断層破砕物質等を用いた年代評価手法の整備（平成 25~26 年度）

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。しかし、断層を覆う後期更新世の地層又は地形面が欠如し、通常の年代測定手法が適用できない場合には、他の手法により活動性を評価する必要がある。そこで、活断層の活動性を評価する指標の一つとして、断層破砕物質の色彩を用いた評価手法を検討した。平成 25 年度に断層破砕物質の色彩及び鉱物化学組成データを蓄積した。平成 26 年度は時間の経過に伴う色彩の変化から、岩石が破砕してからの経過時間を推定することにより、相対的な断層の活動性を把握することができた。

#### ③活断層のセグメント区分と連動性の評価手法の整備（平成 25~27 年度）

地下の震源断層の連動性を評価するにあたっては、地表付近における活断層の性状に関する総合的な調査結果を参照することが有効である。そこで、平成 25 年度から平成 26 年度に渡りセグメント区分及び連動性評価に関する新たな手法を考案し、その適用性及び信頼性を整理した。平成 27 年度はこれに加え、地球物理学的データに基づいたセグメント区分の手法及びその妥当性についても整理し、セグメント区分及び連動性を総合的に評価するための知見を蓄積した。結果は下記④の確率論的地震ハザード評価（以下「PSHA」という。）に反映した。

#### ④震源断層モデルの不確実さ要因の整理・評価に関する検討（平成 25~28 年度）

PSHA は、震源断層の評価と相互関係にある。そのため、震源断層モデルの不確実さは PSHA の結果に少なからず影響を与えることから、その影響の程度を把握しておくことが重要である。そこで、平成 25 年度に国内外の PSHA における震源断層モデルの不確実さの取り扱い方について調査し、課題を抽出した。平成 26 年度から平成 27 年度に渡り、特に PSHA への影響が大きいロジックツリーにおける活断層の連動性と平均活動間隔の設定に着目し、これらの設定が PSHA に与える影響について把握した。平成 27 年度はこれに加え、地震の規模別発生頻度を考慮した活断層の平均活動間隔の推定法を考案した。平成 28 年度はこれまでの成果を踏まえ、ロジックツリーの分岐項目の設定において留意すべき点を整理した。

#### ⑤本震・余震型地震の地震ハザード評価手法への適用性の検討（平成 25~26 年度）

平成 23 年東北地方太平洋沖地震は、従来の地震に比べて余震の規模が大きく、発生数もはるかに多いことが明らかになっている。しかし、ある評価サイトにおける地震ハザードに余震がどの程度影響を与えるのかについては、十分に分かっていない。そこで、平成 23 年

東北地方太平洋沖地震に伴って発生した余震を対象にして、平成 25 年度に評価サイトへの余震の影響の度合いを調査した。平成 26 年度は、確率論的手法を用いた本震と余震の時系列地震群を考慮した地震ハザード（以下「時系列ハザード」という。）の評価を行い、本震発生から 1 年間に発生する余震の時系列ハザードが本震のハザードに与える影響（余震が発生したことによる、本震のみ発生した場合の地震動の年超過頻度からの変化）について、定量的に把握した。

## Development of Methods for Seismic Fault Assessment

Jun'ichi UCHIDA, Yutaka MAMADA,  
Tabito MATSU'URA, Masatoshi FUJITA, and Katsunori SUGAYA  
Division of Research for Earthquake and Tsunami

Regulatory Standard and Research Department,  
Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

## Abstract

The NRA regulatory requirements and “Review Guide for Geology and Geological Structure Investigation at and around the Site” require that, concerning “faults that may be active in the future, 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)”. In “The operation guide for the periodic assessment of safety improvement of commercial power reactors”, application of use of “Probabilistic Risk Assessment (PRA) on External Hazards” is mentioned. In order to assess external hazards, it is necessary to solve considerable new issues (e.g. construction of tephrostratigraphy, assessment of uncertainty of fault segments and multiple fault ruptures, and organizing appropriate methods of logic tree branches for assessment of uncertainty). In this project, following five sub-projects have been carried out during fiscal years 2013 to 2016.

## (1) Development of a method for tephrostratigraphic age assessment

Geological age evaluation is very important for seismic fault assessment. In this sub-project, we investigated the tephrostratigraphy in deep submarine deposits (Hole Chikyu C9001C cores) in order to develop a method for tephrostratigraphic age assessment after marine isotopic stage 11 (from approximately 400,000 years in the past). In fiscal years 2013 to 2014, we detected tephra (volcanic ash layers) in the Hole C9001C cores and acquired the chemical composition data for tephra identification. In fiscal years 2015 to 2016, we determined the tephra ages with reference to marine oxygen isotopic curve of the Hole C9001C, and developed a procedure and method for tephra age determination.

(2) Development of a method for fault age assessment using fault fracture materials

Geological age evaluation is very important for seismic fault assessment. However, it is necessary that fault activity should be assessed by alternative methods if usual methods are not applicable due to a lack of normal overlying strata or geomorphic surface upon the fault. In this sub-project, we developed a new method for fault age assessment using the color of fault fracture materials. In fiscal year 2013, we acquired the color data and chemical composition data of fault fracture materials. In fiscal year 2014, we clarified relative fault activities based on the estimation of the lapse of time since rock fractured from the relationship between the color value and the lapse of time.

(3) Development of a method for fault segmentation and multiple fault rupture analysis

It is effective for the assessment of multiple rupture of seismic fault to refer results from general investigation related to active fault nearby ground surface. In fiscal years 2013 to 2014, we developed a new method for fault segmentation and multiple fault rupture analysis, and investigated the applicability and reliability of the method. In fiscal year 2015, we developed an assessment procedure for fault segmentation and multiple fault rupture considering fault segmentation based on geophysical data and their validity. The results from this sub-project have been reflected in the probabilistic seismic hazard assessment (PSHA) mentioned below in (4).

(4) Development of an assessment method for seismic fault models and systematization of factors on their uncertainty

There is a mutual relationship between PSHA and seismic fault assessment. Because uncertainty of seismic fault model affects result of PSHA considerably, it is important to recognize its effect. In fiscal year 2013, we investigated the treatment of uncertainty in domestic and foreign PSHA, and extracted their issues. In fiscal years 2014 to 2015, we focused on scheme of multiple fault rupture and the mean recurrence interval, and examined the effects of their scheme on PSHA. In fiscal year 2015, we developed an assessment procedure for the mean recurrence interval of faulting, considering the earthquake magnitude-frequency (GR law). In fiscal year 2016, we arranged considerable items for the examination of logic tree branches.

(5) Development of a method for the seismic hazard assessment of mainshock-aftershock earthquake sequences

It has been clarified that magnitude and the number of aftershocks of the 2011 Tohoku District-Off the Pacific Ocean Earthquake are large compare to previous earthquakes. However, it is still poorly understood how aftershocks impact on seismic hazard assessment on a site. In fiscal year 2013, we investigated the effects of aftershock sequences on evaluation sites, focusing on the aftershocks that

accompanied the 2011 Tohoku District-Off the Pacific Ocean Earthquake. In fiscal year 2014, we developed a quantitative assessment procedure for the effects of aftershock hazard for one year after the mainshock on the mainshock hazard using PSHA, considering mainshock-aftershock earthquake sequences.

## 目次

1. 序論.....	1
2. 研究期間を通じた主要成果.....	4
2.1 火山灰層序学的年代評価手法の整備.....	4
2.2 断層破碎物質等を用いた年代評価手法の整備.....	11
2.3 活断層のセグメント区分と連動性の評価手法の整備.....	17
2.4 震源断層モデルの不確実さ要因の整理・評価に関する検討.....	23
2.5 本震・余震型地震の地震ハザード評価手法への適用性の検討.....	28
3. 結論.....	34
参考文献.....	36
付録.....	39
「震源断層評価技術の整備」の執筆者.....	42

## 表 一 覧

表 1	C9001C 孔コアで検出された後期・中期更新世テフラ .....	7
表 2	加熱実験により得られた標準試料の色彩変化における反応速度定数.....	14
表 3	標準試料の色彩変化における 15°Cでの反応速度定数及び断層破碎物質の色彩値	14
表 4	ロジックツリーの分岐項目の設定において留意すべき事項.....	25

## 図 一 覧

図 1	新規制基準等を踏まえた震源断層（活断層）の調査及び評価に関するフローと実施項目との対応 .....	3
図 2	更新世の海洋酸素同位体層序を付帯する長尺深海底コアの位置 .....	7
図 3	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 .....	8
図 4	ちきゅう C9001C 孔コア中のテフラに含まれる火山ガラスの $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ プロット .....	9
図 5	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 .....	10
図 6	断層破碎物質の色彩を用いた断層の活動性評価に関する研究の流れ .....	14
図 7	断層破碎物質の色彩測定の方法 .....	15
図 8	各断層露頭における色彩値の測定結果の $a^*\text{-}b^*$ プロット .....	15
図 9	各断層における断層破碎物質の色彩測定結果 .....	16
図 10	断層破碎物質の色彩に基づく相対的な断層活動性の推定結果 .....	16
図 11	活断層の総合的な連動性評価に関する研究の流れ .....	19
図 12	横ずれ断層における河川の屈曲量に関するデータ収集の流れ .....	20
図 13	横ずれ断層における河川の屈曲と計測例 .....	21
図 14	断層沿いの屈曲量測定結果 .....	21
図 15	断層沿いの河川の復元例 .....	22
図 16	断層沿いの屈曲量から推定した平均変位速度 .....	22
図 17	山崎断層帯を対象とした地震ハザードの検討例 .....	26
図 18	2つの活動シナリオによる最大加速度 $1,000\text{Gal}$ の超過確率と超過確率の比及び超過確率 $10^{-4}$ に対する PGA 比の分布 .....	27
図 19	本震・余震型地震の地震ハザード解析のフロー .....	31
図 20	地震ハザードの解析に用いた評価点 .....	31
図 21	東北地震後の余震規模別発生頻度モデル及び東北地震前の余震から作成した余震発生頻度予測式による地震ハザードの比較 .....	32
図 22	観測された余震数と予測式から求めた余震の発生予測数の比較 .....	32
図 23	本震・余震の時系列地震群ハザードと本震ハザードの比較 .....	33



## 1. 序論

新規制基準及び「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、後期更新世の複数の地形面又は連続的な地層が欠如する等、後期更新世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。」とされている。上記のような活断層の活動時期を把握するために、実用的な年代評価手法の一つとして火山灰層序学的手法が広く活用されている。本手法を審査ガイドで示されている中期更新世以降に適用する際には、年代評価手法の適用範囲及び信頼性を踏まえ、火山灰層序を構築することが重要である。また、断層の活動性評価に有効な堆積層が欠如している等の理由により活動年代が不明な断層も多く、このような断層の活動年代を評価するため、断層破砕物質等を用いた評価手順を構築することも重要である。

「実用発電用原子炉の安全性向上評価に関する運用ガイド」では、安全性の向上のため自主的に講じた措置の調査及び分析、並びに総合的な評価として、「外部事象に係る確率論的リスク評価（PRA）」（以下「リスク評価」という。）の活用が挙げられている。リスク評価で用いられる確率論的地震ハザード評価では、地震の大きさ、頻度、断層帯の活動シナリオ等の不確実さを踏まえて地震動の超過確率を評価する。そのうち、認識論的不確実さの評価については震源断層モデルのパラメータ設定の決定プロセスを表現するロジックツリーを利用する手法が用いられているが、その際、ロジックツリーの分岐を適切に設定することが重要となる。特に上記のような活動年代が不明な断層に関する頻度の設定、活断層のセグメント区分とその連動性の設定に係る不確実さは評価結果を大きく左右するため、分岐項目及び分岐の重み付けの設定法を整理しておくことが重要である。また、平成23年東北地方太平洋沖地震（以下「東北地震」という。）は、従来の地震に比べて余震の規模が大きく、発生数もはるかに多いことが明らかになっているが、ある評価サイトにおける本震及び余震によって生じる地震動の超過頻度に余震がどの程度影響を与えるのか、十分に分かっておらず、巨大地震に伴う余震が地震ハザード評価に与える影響について把握することも重要である。

上記の背景を踏まえた現状及び課題の分析を通して研究課題を抽出し、震源断層（活断層）の調査及び評価に関するフローを作成した（図1）。これに対応させて平成25年度から平成28年度に渡り、下記の研究課題（①～⑤）に取り組んだ。なお、このフローは地震調査研究推進本部により公表された「活断層の長期評価手法」（暫定版）報告書<sup>(参1)</sup>で示されている課題も踏まえて作成しており、従来の手順のほか、地表に明瞭な痕跡を残さない活断層の評価手順も含めている。

#### ①火山灰層序学的年代評価手法の整備（平成 25~28 年度）

震源断層の評価にとって、活断層の活動性に関わる地形面等の年代評価は極めて重要な役割をもつ。そこで、新規基準に対応する約 40 万年前以降の年代評価に関する知見を蓄積するため、海洋酸素同位体比曲線が明らかにされており、長期間かつ高い時間分解能を有する深海底堆積物（ちきゅう C9001C コア）を対象に、火山灰（テフラ）の検出及び年代決定に関する手順及び手法を取りまとめた。

#### ②断層破砕物質等を用いた年代評価手法の整備（平成 25~26 年度）

震源断層の評価にとって、活断層の活動性に関わる地層等の年代評価は極めて重要な役割をもつ。しかし、断層を覆う後期更新世の地層又は地形面が欠如し、通常年代測定手法が適用できない場合には、他の手法により活動性を評価する必要がある。そこで、活断層の活動性を評価する指標の一つとして、断層破砕物質の色彩を用いた評価手法を検討した。断層破砕物質の色彩及び鉱物化学組成データを蓄積し、時間の経過に伴う色彩（以下「色彩値」という。）の変化から、岩石が破砕してからの経過時間を推定することにより、相対的な断層の活動性を把握することができた。

#### ③活断層のセグメント区分と連動性の評価手法の整備（平成 25~27 年度）

地下の震源断層の連動性を評価するにあたっては、地表付近における活断層の性状に関する総合的な調査結果を参照することが有効である。そこで、活断層のセグメント区分及び連動性評価に関する新たな手法を考案し、その適用性及び信頼性を整理した。また、地球物理学的データに基づいたセグメント区分の手法及びその妥当性についても整理し、セグメント区分及び連動性を総合的に評価するための知見を蓄積した。結果は下記④の確率論的地震ハザード評価（以下「PSHA」という。）に反映した。

#### ④震源断層モデルの不確かさ要因の整理・評価に関する検討（平成 25~28 年度）

PSHA は、震源断層の評価と相互関係にある。そのため、震源断層モデルの不確かさは PSHA の結果に少なからず影響を与えることから、その影響の程度を把握しておくことが重要である。そこで、特に震源断層モデルの不確かさ要因として、PSHA への影響が大きいロジックツリーにおける活断層の連動性と平均活動間隔の設定に着目し、これらの設定が PSHA に与える影響について把握した。また、地震の規模別発生頻度を考慮した活断層の平均活動間隔の推定法についても考案し、ロジックツリーの分岐項目の設定において留意すべき点を整理した。

#### ⑤本震・余震型地震の地震ハザード評価手法への適用性の検討（平成 25~26 年度）

余震によって生じる地震動の超過頻度の評価は検討事例が少なく、ある評価サイトにおける本震及び余震によって生じる地震動の超過頻度に余震がどの程度影響を与えるのか、

十分に分かっていない。そこで、東北地震に伴って発生した余震を対象にして、評価サイトへの余震の影響の度合いを調査した。そして、確率論的手法を用いた本震と余震の時系列ハザードの評価を行い、本震発生から1年間に発生する余震の時系列ハザードが本震のハザードに与える影響(余震が発生したことによる、本震のみ発生した場合の地震動の年超過頻度からの変化)について、定量的に把握した。

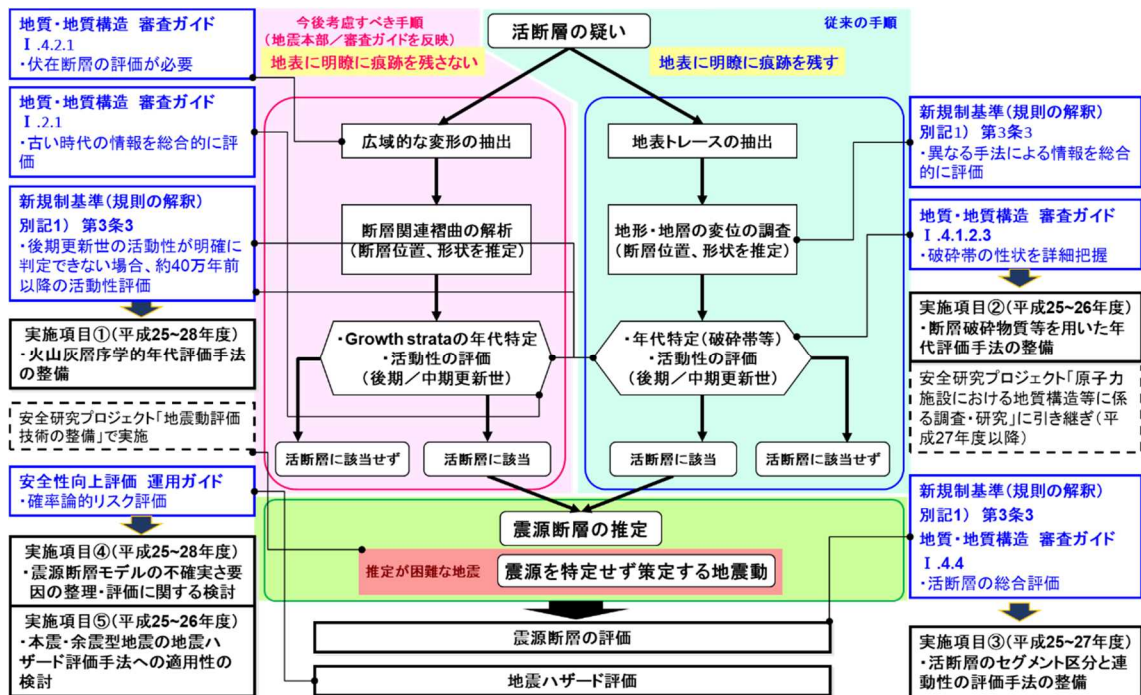


図1 新規制基準等を踏まえた震源断層(活断層)の調査及び評価に関するフローと実施項目との対応

Fig. 1 Relationship between sub-project and flow on survey and assessment for earthquake source fault (active fault) considering the NRA regulatory requirements

## 2. 研究期間を通じた主要成果

### 2.1 火山灰層序学的年代評価手法の整備

#### (1) はじめに

テフラ（火山灰、軽石等を含む。）は、爆発的な火山活動に伴って生産され、ごく短期間に広範囲を覆うことから、有効な同時代面となりうる。このようなテフラの特性は、精度の高い年代決定がされている堆積物中に挟在するテフラを検出することによって、テフラ年代の信頼性を向上させることができるとともに、その年代を遠隔地の地点の堆積物に適用できるメリットをもつ。そのため、テフラ年代を、新規基準に記載された中期更新世以降（約 40 万年前以降、MIS11 以降にほぼ対応）の断層変位指標の年代決定に活用するためには、テフラの保存が良く、長期間かつ高い時間分解能を有する堆積物を選択する必要がある。

深海底堆積物は、地球軌道要素に起因する日射量変化（付録 用語解説 1）の歴史を海洋酸素同位体比曲線という形で記録している。この曲線は、中期更新世以降において、氷期（寒冷期）と間氷期（温暖期）の繰り返しが約 10 万年の周期的をもって継続してきたことを示しており、重要な年代情報となりうる。氷期と間氷期の繰り返しは、時代の新しい方から古い方へ向かって数字を割り当てた海洋酸素同位体ステージ（MIS, Marine oxygen isotopic stage : 付録 用語解説 2）として記載され、地層の上下関係に基づく層序学的な年代指標として重要である。

日本列島太平洋沿いでは、海洋酸素同位体比曲線が明らかにされている深海底堆積物が数地点で報告されている（図 2）。これらのうち、琉球列島沖 MD01-2398 コアは MIS 12 以降の記録を、四国沖 MD01-2422 コアは MIS 10 以降の記録を、下北沖 C9001C 孔コアは MIS 18 以降の記録を有する。特に C9001C 孔は、中期更新世以降を完全に内包するので、日本列島北部太平洋沿いの標準的な層序を提供しうる。

このように、C9001C 孔コアに挟在するテフラは、海洋酸素同位体比曲線を参照することによって、地球軌道要素に基づく精度の高い年代決定がされることが期待される。ただし、コアの欠損または海洋酸素同位体比曲線が不明瞭であることに起因して、曲線の解釈、すなわち堆積物の MIS への割り当て（年代決定）は大きな不確実性をもつ。具体的には、異なる周期の氷期（または間氷期）への対比によって、約 10 万年の「ボタンの掛け違い」が生ずるため、海洋酸素同位体比曲線を参照して決定されるテフラ年代にも大きな不確実性を与える。この問題については、上記テフラの特性を活用して、他の地点における年代既知テフラを C9001C 孔コアで複数検出することによってテフラ層序を構築し、既報テフラ年代と C9001C 孔コアの海洋酸素同位体比曲線を照合することで、両者に対する合理的な年代決定をする必要がある。

本研究では、C9001C 孔コアにおける中期更新世以降の堆積物を対象に、テフラの検出を行った。まず、コア中のガラス破片数を調べ、テフラの深度（層準）を記載した。次にガラ

スの化学組成を分析し、テフラを特徴化した。また、これらのテフラを陸上の堆積物中に介するテフラに対比することで、海陸共通のテフラ層序を構築し、各テフラの年代を共有した。最後に、テフラ年代と海洋酸素同位体比曲線を照合して、C9001C 孔コアの年代と深度の関係（以下「年代モデル」という。）を検討した。

## （2）研究対象物質及び手法

C9001C 孔の全コア長（365.33 m）を対象に、アーカイブ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、鉍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、火山ガラス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 3）。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火山ガラスの主成分化学組成を測定した。

## （3）深海底堆積物のテフラ層序構築

下北半島沖の深海底堆積物（ちきゅう C9001C 孔コア；図 2）から見出した後期更新世（約 12~13 万年前以降）及び中期更新世（13~80 万年前）のテフラを表 1 に示す。これらテフラの多くは、火山ガラスの  $\text{SiO}_2$  及び  $\text{K}_2\text{O}$  含有量で特徴化できる（図 4 (a)）。後期更新世について、北東北の火山（十和田火山）から噴出したテフラの火山ガラスは  $\text{K}_2\text{O}$  含有量が少なく（2 wt.%以下）、北海道の火山から噴出したそれは  $\text{K}_2\text{O}$  含有量が中程度（2~3 wt.%前後）、遠方火山（中部山岳、山陰、九州）から噴出したそれは  $\text{K}_2\text{O}$  含有量が多い（3.5 wt.%以上）。なお、十和田火山から噴出したテフラは、互いに似た火山ガラスの主成分化学組成を示すため、個々のテフラの識別は困難である。今後、火山ガラスの主成分化学組成以外の指標を用いて、テフラの特徴化・対比を行っていく必要がある。

一方、中期更新世のテフラについて、北東北の火山から噴出したテフラの火山ガラス  $\text{K}_2\text{O}$  含有量は少ない（2 wt.%以下；図 4 (b)）。南東北の火山から噴出したテフラは  $\text{K}_2\text{O}$  含有量は中程度（2.4 wt.%程度）、九州の火山から噴出したそれは  $\text{K}_2\text{O}$  含有量がやや多い（3.0~3.4 wt.%程度）。アジア大陸（中国・北朝鮮国境付近）の白頭山から噴出したテフラの火山ガラスは、 $\text{SiO}_2$  が少なく（65 wt.%程度） $\text{K}_2\text{O}$  含有量が非常に多い（6 wt.%程度）。これらの中で、Nh-IV 及び Ks5 は C9001C 孔コアで明らかにされている海洋酸素同位体比曲線を参照すると、それぞれ MIS 10d（約 35.7 万年前）、MIS 12b~12c（43.4~45.8 万年前）に対応する（図 5）。これらのテフラ年代は、近畿地方において、海洋酸素同位体比曲線を有する深海底堆積物ではないものの、異なる周期の氷期に対応した 2 つの陸域堆積物に、Nh-IV、Ks5 がそ

れぞれ介在するという既報<sup>(参2)</sup>と整合的である。さらに、C9001C 孔コアの活用によって、Nh-IV 及び Ks5 は信頼性の高い年代を取得できた。しかし、近畿地方より東の地域、特に C9001C 孔掘削地点に近い東北地方で、このようなテフラ層序はいまだ確認されていないため、東北地方の別の場所でも同様のテフラ層序を確認し、Nh-IV、Ks5 対比の信頼性を向上させる必要は残されている。しかしながら、日本近海における最近約 40 万年間の年代モデルを構築することができた(図 5)。本研究のテフラ層序に基づく年代モデルは、既報の微化石層序に基づく年代モデルに見られた堆積速度が異様に速い期間(図 5 の MIS 7 : 約 18 ~ 24 万年前)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。さらに、この年代モデルを用いて、従来 MIS に対比されていなかった WP、ODP794 2H-2-120、So-OT の既報年代を高精度に再決定することができ、年代指標の妥当性評価に活用できる見通しを得た。

なお、深海底堆積物中に介在するテフラは、噴出時に空中に飛散した後、水上・水中の移動を経て海底に定置したものであるため、水上・水中の運搬時間が長いほど噴火時期から離れた堆積時代を示す。例えば屈斜路火山から噴出した Kc-Sr は、本州の堆積物においてテフラ層として検出されていないことから判断して<sup>(参3)</sup>、給源から C9001C 掘削地点付近を南西到達限界として空中降下した可能性のほかに、親潮海流によって南西へ運搬された可能性も考えられる。後者の場合、C9001C 孔コアにおける Kc-Sr の層準は、噴出年代よりも若い年代を示す可能性がある。しかしながら、コア中の Kc-Sr の層位年代は、北海道東部における既報の層序年代や放射性炭素年代と整合的であり、噴出年代と大きな差がないと判断される。今後、多くのテフラを検出してそれらの年代をクロスチェックすることにより、信頼性の高いテフラ層序を構築していくことが必要である。

表 1 C9001C 孔コアで検出された後期・中期更新世テフラ

Table.1 Late and Middle Pleistocene tephras in the Hole C9001C sediments

後期更新世(Late Pleistocene)	中期更新世(Middle Pleistocene)
十和田八戸 (To-H)	White Pumice (WP)
十和田ビスケット 2 (To-BP2)	ODP794 2H-2-120
十和田大不動 (To-Of)	田名部 Cii-Ciii (Tn-Cii-Ciii)
駒ヶ岳 i (Ko-i)	田名部 Ci (Tn-Ci)
屈斜路庶路 (Kc-Sr)	塩原大田原 (So-OT)
支笏 1 (Spfa-1)	鳴尾浜 IV (Nh-IV)
十和田 (Towada-1)	笠森 5 (Ks5)
十和田 (Towada-2)	
十和田 (Towada-3)	
阿蘇 4 (Aso-4)	
三瓶木次 (SK)	
洞爺 (Toya)	

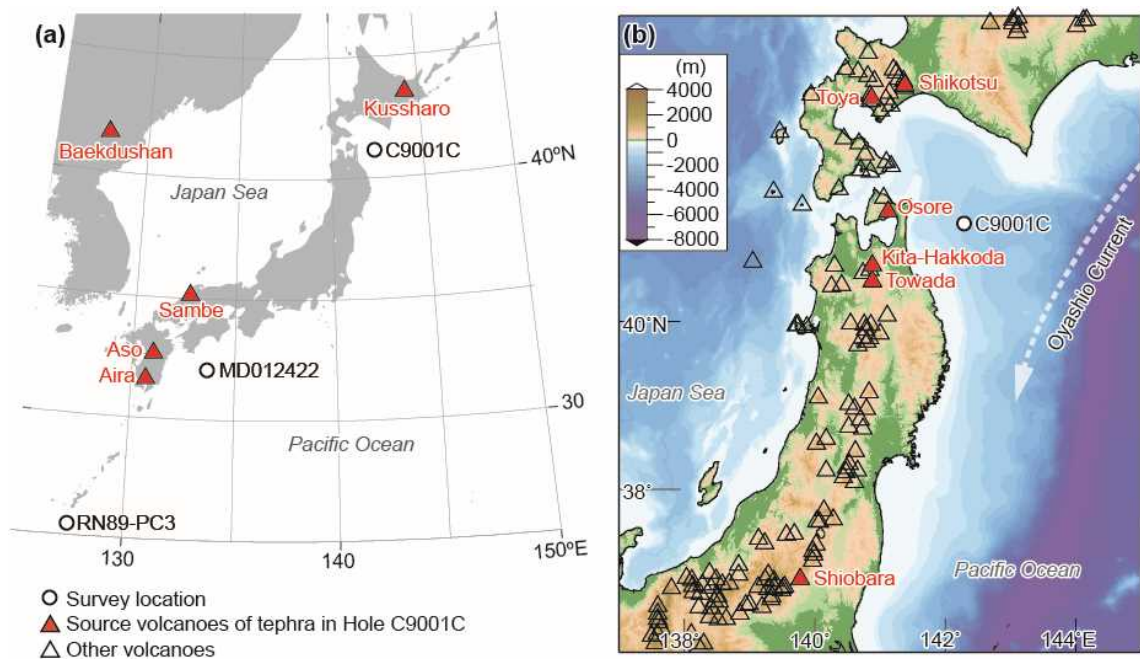


図 2 更新世の海洋酸素同位体層序を付帯する長尺深海底コアの位置

C9001C 孔のテフラ供給火山 (赤い三角) の位置も示す。(a)日本列島及び東北アジア地域、(b)東北及び北海道地方。Matsu'ura et al. (2014, 2017)<sup>(参4)(参5)</sup>、Matsu'ura and Komatsubara (2018)<sup>(参6)</sup> を編集した。

Fig. 2 Locations of long deep-sediments associated with Pleistocene marine oxygen isotopic stratigraphy

Locations of source volcanos (red triangles) are also shown. (a) Japan islands and NE Asian continent. (b) Tohoku and Hokkaido regions. Compiled from Matsu'ura et al. (2014, 2017)<sup>(Ref.4)(Ref.5)</sup>, Matsu'ura and Komatsubara (2018)<sup>(Ref.6)</sup>.

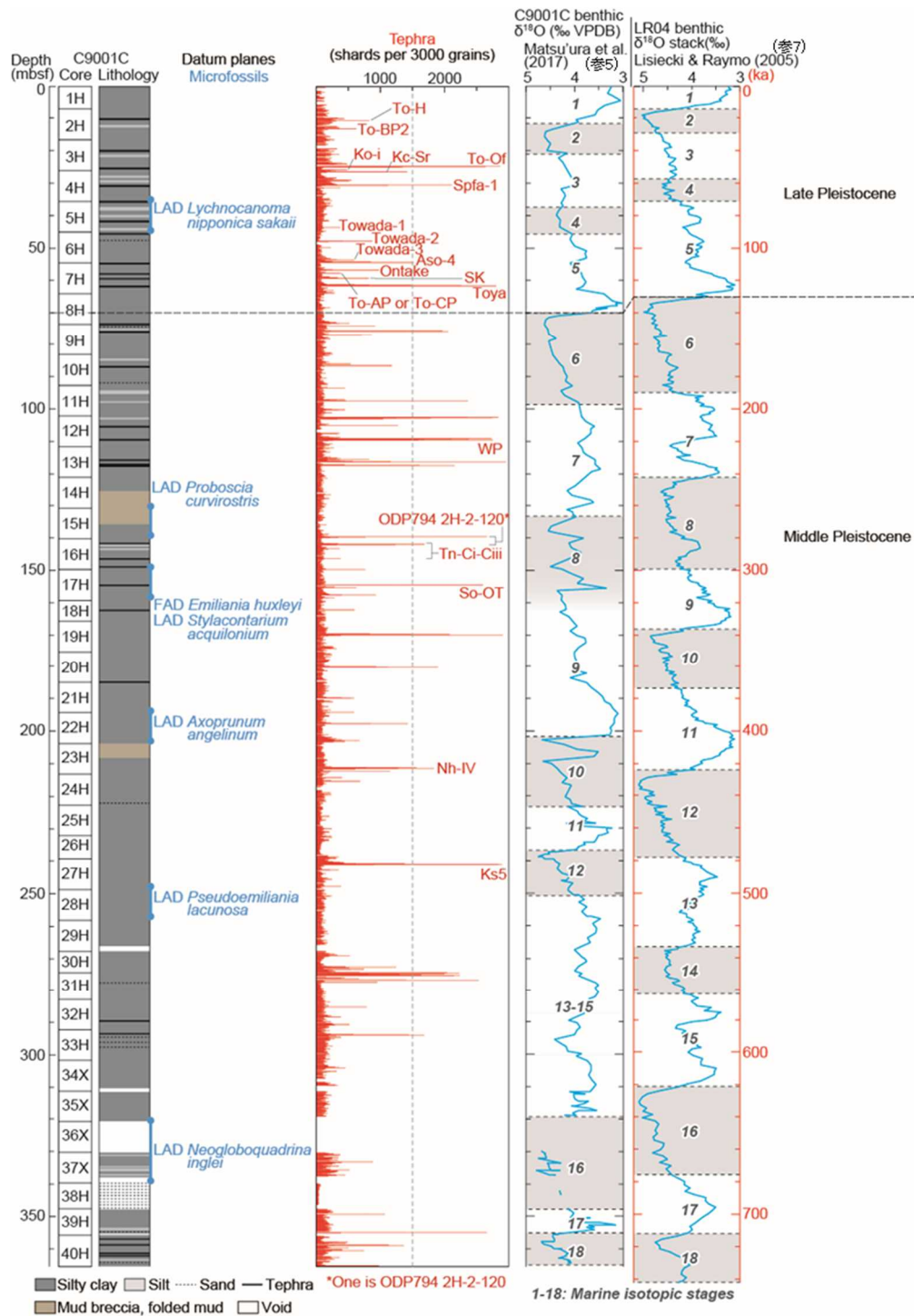


図3 ちきゅう C9001C 孔の層相、微化石年代層序、テフラ層序及び海洋酸素同位体層序

Matsu'ura et al. (2014, 2017) (参4) (参5)、Matsu'ura and Komatsubara (2018) (参6) を編集した。

Fig. 3 Core lithology, biostratigraphy, tephrostratigraphy and marine oxygen isotopic stratigraphy of Chikyu Hole C9001C

Compiled from Matsu'ura et al. (2014, 2017) (Ref.4)(Ref.5), Matsu'ura and Komatsubara (2018) (Ref.6).

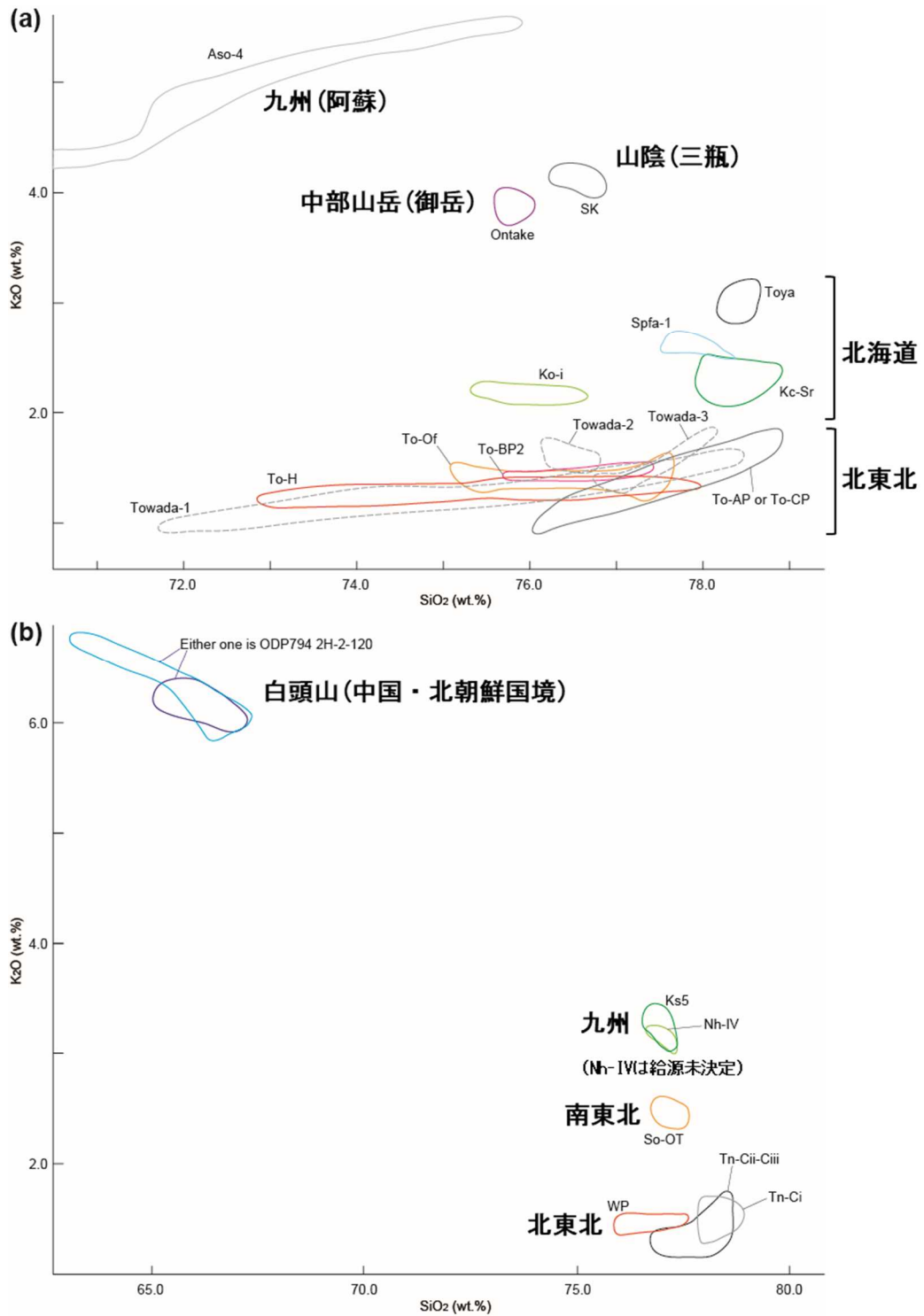


図4 ちきゅう C9001C 孔コア中のテフラに含まれる火山ガラスの SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O プロット

(a) 後期更新世テフラ、(b) 中期更新世テフラ。wt.%は重量%。Matsu'ura et al. (2014, 2017) (参4) (参5)、Matsu'ura and Komatsubara (2018) (参6) を編集した。

Fig. 4 Plots of SiO<sub>2</sub> against K<sub>2</sub>O in glass shards of tephra in cores of Chikyū Hole C9001C

(a) Late Pleistocene tephra, (b) Middle Pleistocene tephra. wt.% denotes weight %. Compiled from Matsu'ura et al. (2014, 2017) (Ref.4)(Ref.5), Matsu'ura and Komatsubara (2018) (Ref.6).

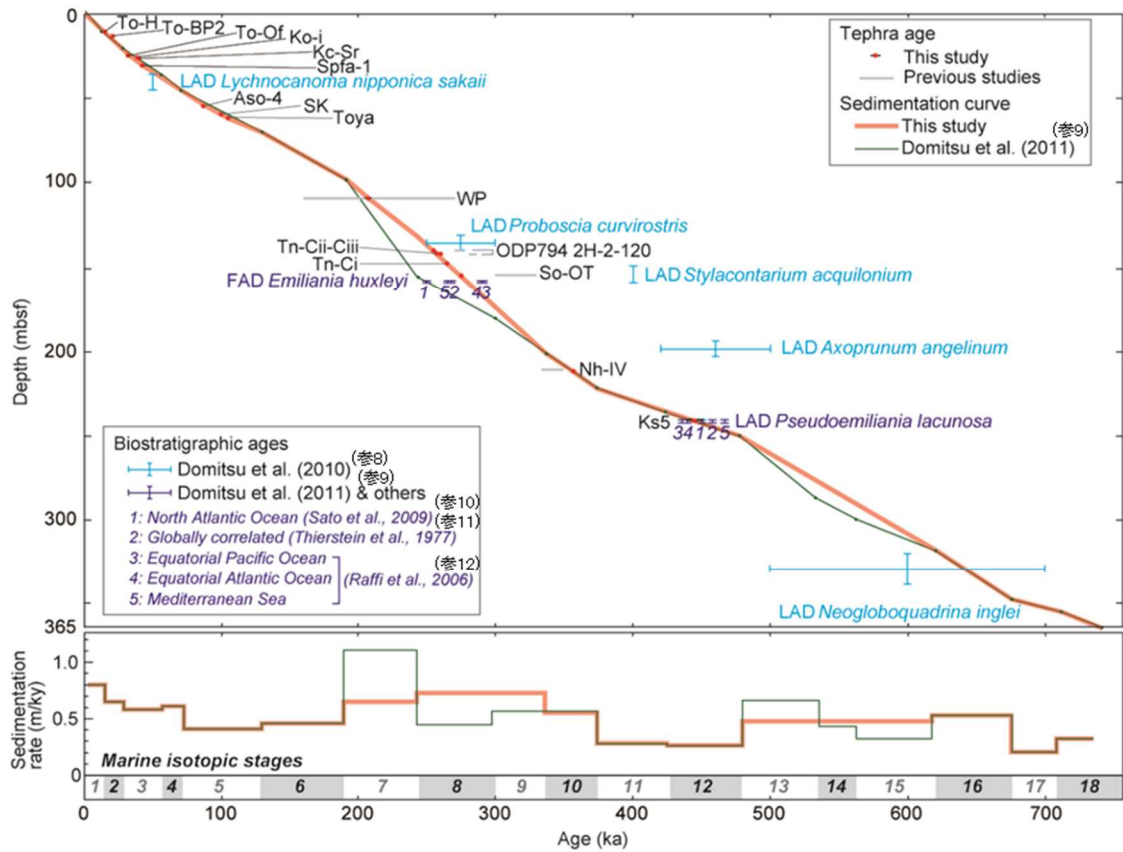


図5 ちきゅう C9001C 孔の深海底堆積物のテフラ層序、微化石年代層序及び年代モデル Matsu'ura et al. (2017) (参5) より引用。

Fig.5 Tephrostratigraphy, biostratigraphy and age models of Chikyu Hole C9001C After Matsu'ura et al. (2017) (Ref.5).

## 2.2 断層破砕物質等を用いた年代評価手法の整備

### (1) はじめに

断層の活動性（活動時期、周期等）を推定する方法の一つに、断層活動後に断層破砕物質の色彩が経時変化する現象を利用する手法がある。宮下ほか（2011）<sup>(参13)</sup>は、2000年鳥取県西部地震の余震域及びこれに併走する断層沿いに分布する断層破砕物質の色彩を調査した。その結果、活動度の異なる断層間で色彩の傾向が大きく異なることから、断層破砕物質の色彩が断層の活動性の違いに対応していると結論づけた。間中ほか（2012）<sup>(参14)</sup>は、宮下ほか（2011）<sup>(参13)</sup>の結果を発展させ、2000年鳥取県西部地震の余震域及び非余震域の断層破砕物質を鉱物学的、化学的特徴により明確に判別できることを示した。

断層破砕物質の変色の程度から、何らかの時間情報を得ることができれば、断層の活動性評価のツールとなると期待されるが、変色は自然界において長期間で進行すると考えられる。そこで、実験室内で色彩の変化の進行速度を人工的に速めることにより、経過時間と色彩値との関係性を把握し、自然状態の断層破砕物質の色彩値に適用することにより、断層活動後の経過時間を推定した（図6）。なお、本節の内容の一部は内田・宮脇（2016）<sup>(参15)</sup>において公表されている。

### (2) 野外における断層破砕物質の色彩測定方法及び測定結果

郷村断層、淡路断層帯（野島断層及び楠本断層）、警固-西山断層帯において断層露頭を確認し、各断層の断層破砕物質を対象に、それぞれ複数地点で色彩を測定した（1地点につき50回測定）。これらの地点の選定に当たっては、鉱物組成の差異が色彩測定に及ぼす影響を軽減するため、花崗岩分布域に限定した。なお、断層露頭の確認に当たっては、やや広域的な調査に基づいているため、対象とした断層露頭は必ずしも最新活動面を含むとは限らない。

色彩の測定に当たって、光源の種類や量を一定に保つなど、測定方法を統一する必要がある。そこで、分光測色計 CM-700d を用いて色彩を測定し、 $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  表色系による色彩値（ $L^*$  は明度、 $+a^*$  は赤方向、 $-a^*$  は緑方向、 $+b^*$  は黄方向、 $-b^*$  は青方向を示す色彩値）として統一的に表示することにした。また、岩石は様々な色彩の鉱物から構成され、単位面積当たりの色彩は一様でないことから、1箇所あたり50点の無作為色彩測定を行い、平均値、標準偏差値を求め、それらの値を色彩値とした。必要な測定数については、誤差が15%未満となるように計算して決定した。

測色範囲については、地表水による風化の影響を避けるため、面的に変色している部分を避け、断層面又は脈に沿った線的な変色が認められる部分を選定した。選定後は、測定面を薄く剥ぎ取り、水で軽く洗い流し、新鮮面を約50cm四方露出させた。露出した断層破砕物質が脈状に認められる場合（断層幅5cm未満）及び厚みが認められる場合（幅10cm以上）

があることから、変則的な測定方法による結果の偏りが生じないように、それぞれの場合に応じて色彩の測定方法を統一した（図7）。

測定の結果を図8に示す。野島断層における  $a^*$ - $b^*$  の色彩分布は正の相関を示す ( $R=0.86$ )。  $a^*$  に関しては、  $0 < a^* < 13$  に渡り、  $b^*$  に関しては、  $2 < b^* < 28$  に渡って広く分布している。楠本断層における  $a^*$ - $b^*$  の色彩分布も正の相関を示し ( $R=0.96$ )、回帰直線は野島断層における色彩測定で得られた回帰直線とほぼ一致する。  $a^*$  に関しては、  $-3 < a^* < 15$  に渡り、  $b^*$  に関しては、  $3 < b^* < 33$  に渡って広く分布している。また、  $a^*$  及び  $b^*$  値が小さくなるほど、標準偏差が小さくなる傾向が認められた。郷村断層における  $a^*$ - $b^*$  の色彩分布も正の相関を示す ( $R=0.84$ )。  $a^*$  に関しては、  $1 < a^* < 14$  に渡り、  $b^*$  に関しては、  $12 < b^* < 30$  に渡って広く分布している。ただし、  $a^*$  は  $12 < a^*$  の色彩値を示す試料が極端に減少している。警固-西山断層帯における  $a^*$ - $b^*$  の色彩分布も正の相関を示す ( $R=0.75$ )。  $a^*$  に関しては、  $2 < a^* < 12$  に渡り、  $b^*$  に関しては、  $8 < b^* < 28$  に渡って広く分布している。ただし、  $a^*$  は  $12 < a^*$  の色彩値を示す試料が極端に減少している。

さらに、各断層の  $a^*$  及び  $b^*$  の色彩分布を比較したところ、正規分布又は対数正規分布に従うような形状の分布パターンのほか、形状にばらつきのある複数のピークをもつ分布パターンも見られた（図9）。

### （3）室内加温実験による反応速度定数の推定及び年代標準式

地表付近の断層破碎帯周辺では酸化帯において酸化反応が進行するが、断層活動時には水素ガスの発生により還元環境に戻されると考えられている<sup>(参16)</sup>。このような過程に伴う含鉄鉱物相の変化が、断層破碎物質の色彩変化に大きな影響を与えると考えられる。断層破碎物質の色彩から断層活動後の経過時間を推定するためには、断層破碎物質の常温での色彩変化速度を求める必要があるが、そのためには長期間での実験が必要となり現実的ではない。そこで反応を速めるため、郷村断層、野島断層及び警固-西山断層帯の未変質の標準岩石試料（花崗岩）を用いて様々な温度条件で加熱を繰り返し、その都度、分光測色計を用いて色彩を測定した。これにより、各温度での反応速度定数  $k$  ( $a^*$  及び  $b^*$  の反応速度定数をそれぞれ  $k_a$  及び  $k_b$  とする) を求めた（表2）。反応速度式で示される速度定数  $k_a$  及び  $k_b$  は温度に依存し、一般的にアレニウスの式によって与えられることから、アレニウスプロットにより常温（15°C）における  $k_a$  及び  $k_b$  を推定した（表3）。そして、岩石の色彩変化が一次反応であると仮定することにより、 $a^*$  及び  $b^*$  についての年代標準式を導出した（付録 岩石の色彩値を用いた年代標準式の導出）。よって、加熱実験から色彩値の最大値  $a^*_{\max}$  ( $b^*_{\max}$ )、速度定数  $k_a$  ( $k_b$ )、初期値  $a^*_0$  ( $b^*_0$ ) を求めることができれば、岩石の色彩変化にかかる時間を求めることができる。

#### (4) 評価結果

上記の化学反応速度論に基づき断層破碎物質の色彩値( $a^*$ 及び $b^*$ の最大値、ピーク値等)、 $k_a$ 及び $k_b$ から、断層の活動性を推定した<sup>(参15)</sup>(表3、図10)。

それぞれの断層の活動性に関する相対的な関係は以下の通りである。

- ・ $a^*$ 値に基づく経過時間：野島断層<郷村断層<<警固-西山断層帯
- ・ $b^*$ 値に基づく経過時間：野島断層<郷村断層<<警固-西山断層帯

この結果は、相対的な関係に着目する限りにおいては、歴史地震及び既知の情報<sup>(参17)</sup>とある程度整合している。ただし、色彩値から求めた経過時間は、歴史地震及び既知の情報に基づく最新活動からの経過時間に比べて大幅に足りていない。この原因として、実験室では一次反応を考慮しているが、露頭では地表水等の影響により、複雑な反応が関与している可能性が挙げられる。また、母岩としている試料の個体差、風化過程における化学的条件の差異、断層活動時に色彩が初期値に戻るかどうか等の不確実性もあることから、本手法の適用に当たっては、他の手法も含めた総合的な評価における一つの参考情報として扱うことが適切であると考ええる。

本研究では、上記のような信頼性及び不確実性に対する課題があるものの、活断層の活動性に関する情報を得る方法の一つとして、断層破碎物質の色彩を用いた評価手法を検討し、断層の相対的な活動性を導くことができた。

表2 加熱実験により得られた標準試料の色彩変化における反応速度定数

Table.2 Reaction rate constants of color changes of standard samples from heating experiments

	加熱温度 (°C)	a*の反応速度定数 ( $k_a$ )			b*の反応速度定数 ( $k_b$ )		
		郷村 断層	警固-西山 断層帯	野島断層	郷村 断層	警固-西山 断層帯	野島断層
低温	100	0.0009	0.0006	0.0007	0.0008	0.0008	0.0008
	127	0.0010	0.0009	0.0008	0.0011	0.0010	0.0028
	177	0.0015	0.0010	0.0011	0.0016	0.0015	0.0030
	227	0.0020	0.0015	0.0013	0.0019	0.0020	0.0061
高温	177	0.0015	0.0013	0.0080	0.0065	0.0043	0.0110
	277	0.0056	0.0022	0.0030	0.0031	0.0042	0.0150
	327	0.0230	0.0056	0.0060	0.0250	0.0059	0.0120
	377	0.0530	0.0780	0.0160	0.0420	0.0870	0.0780

表3 標準試料の色彩変化における15°Cでの反応速度定数及び断層破碎物質の色彩値

Table.3 Reaction rate constants of color changes of standard samples at temperature of 15 degrees

Celsius and color values of fault fracture materials

	郷村断層	警固-西山断層帯	野島断層
15°Cの $k_a$	$2.75 \times 10^{-5}$	$2.58 \times 10^{-5}$	$1.06 \times 10^{-4}$
15°Cの $k_b$	$5.18 \times 10^{-5}$	$4.69 \times 10^{-5}$	$9.37 \times 10^{-5}$
a*	6.61	5   11	5.28
a <sub>max</sub> *	25	18	15
b*	15   26	22.1	3   7   17
b <sub>max</sub> *	34	35	32

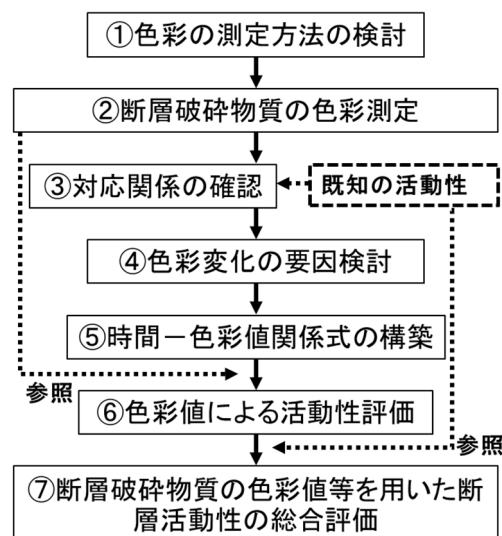


図6 断層破碎物質の色彩を用いた断層の活動性評価に関する研究の流れ

Fig. 6 Study flow for assessment of fault activity using color variations of fault fracture materials

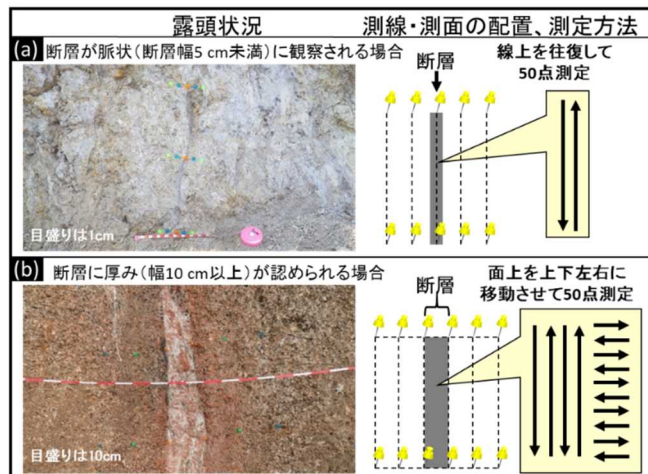


図7 断層破碎物質の色彩測定の方法

JNES (2014)<sup>(参18)</sup> を一部利用した。

Fig. 7 Method of color measurement of fault fracture materials

Used from JNES (2014)<sup>(Ref.18)</sup> in part.

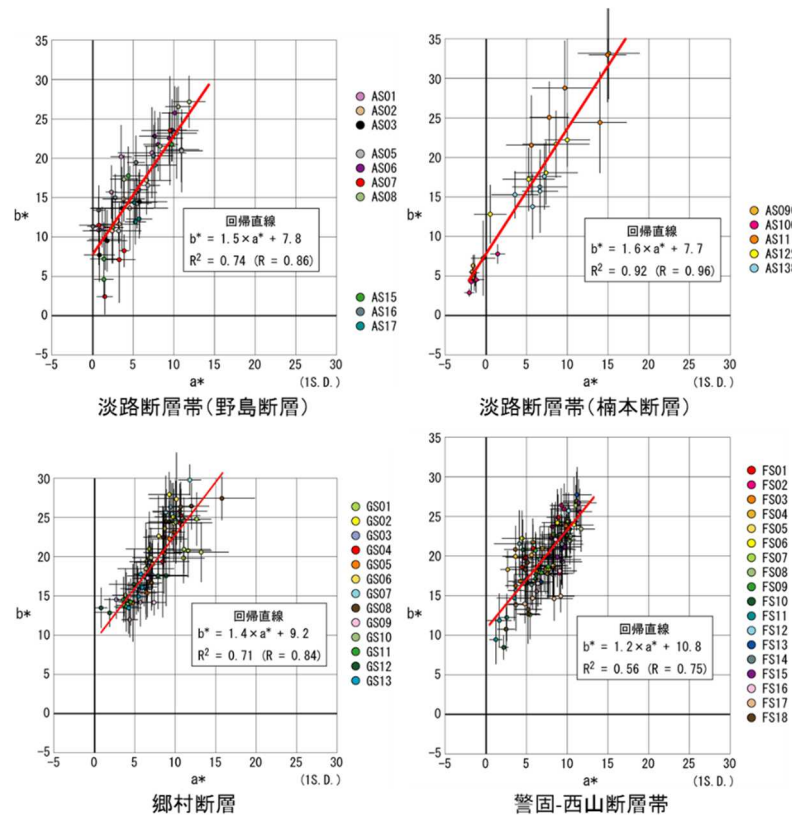


図8 各断層露頭における色彩値の測定結果のa\*-b\*プロット

JNES (2014)<sup>(参18)</sup> を一部改変した。

Fig. 8 Plots of color value of fault fracture materials of fault outcrops

Modified from JNES (2014)<sup>(Ref.18)</sup> in part.

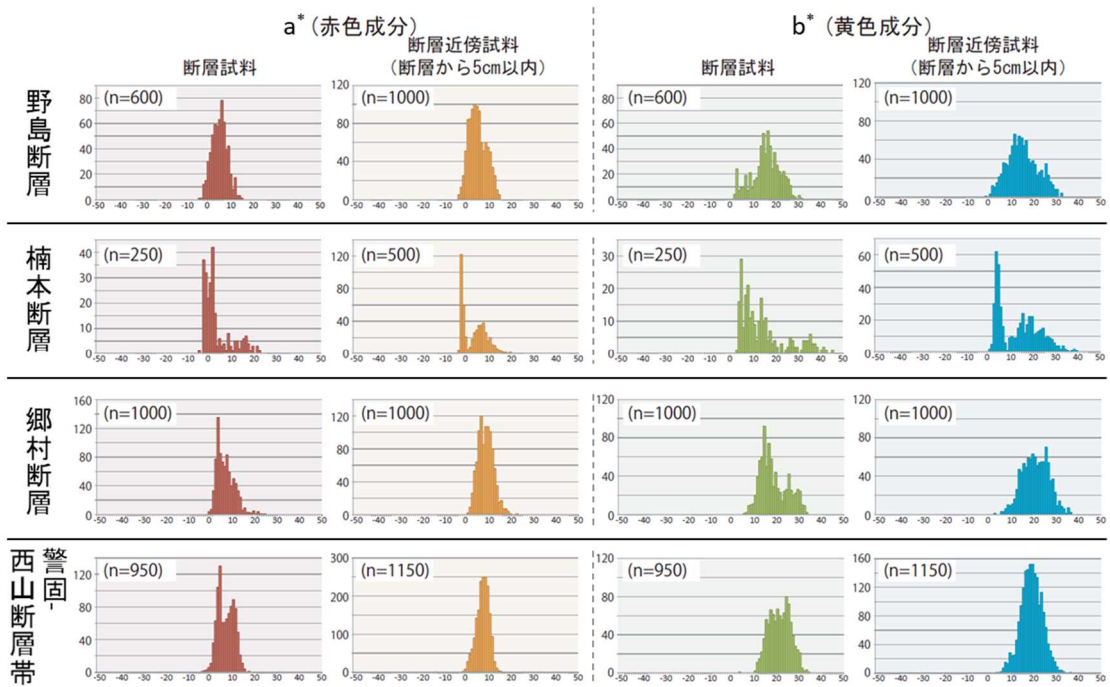


図9 各断層における断層破砕物質の色彩測定結果

JNES (2014) (参18) を一部改変した。

Fig. 9 Color variations of fault fracture materials

Modified from JNES (2014)<sup>(Ref.18)</sup> in part.

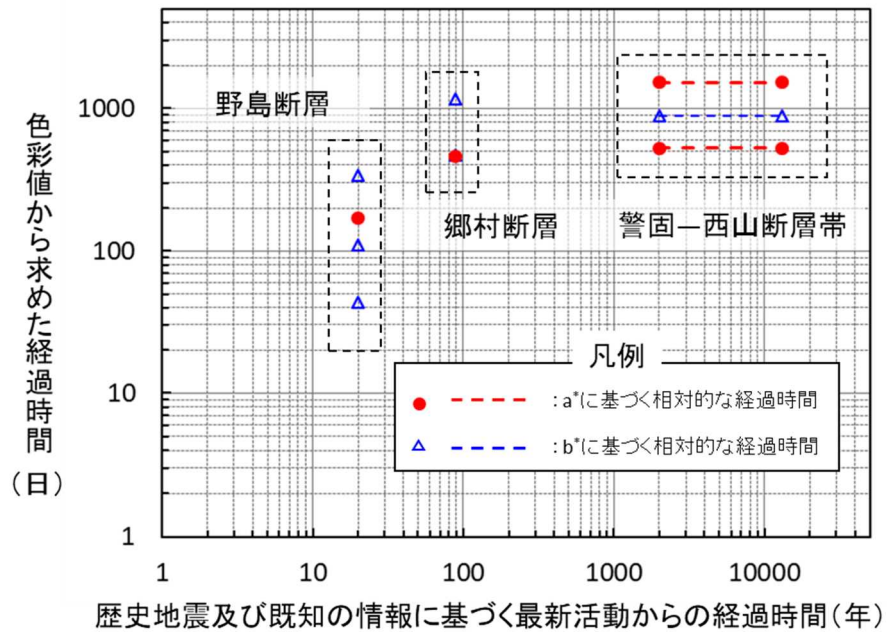


図10 断層破砕物質の色彩に基づく相対的な断層活動性の推定結果

Fig. 10 Relative fault activities based on color variations of fault fracture materials

## 2.3 活断層のセグメント区分と連動性の評価手法の整備

### (1) はじめに

PSHA で考慮される不確実さは偶然的な不確実さと認識論的不確実さの 2 つに分けて考えられている。そのうち認識論的不確実さは、知識及び認識の不足に係る不確実さとされ、評価に用いるデータの不足、モデルの詳細度、複数の専門家の解釈の相違等を要因とする<sup>(参19)</sup>。認識論的不確実さを評価する際には、ロジックツリー（以下「LT」という。）を利用する手法が用いられている。そして LT における各分岐には、専門家により重みが与えられる。活断層の連動性の評価は多くの場合、認識論的不確実さとして扱われ、活断層帯を対象とした PSHA で構築される LT において、主要な分岐項目となる。活断層の連動性（連動パターン）に関する分岐については、評価に有用なデータが少ないことにより等分配の重みが与えられることも多いが、連動性の評価につながるデータを根拠とした重みが与えられることが望ましい。

活断層の連動性は、既存文献の調査、変動地形学的調査、地質調査及び地球物理学的調査の結果から総合的に評価されるが、その基本となる構造として、活断層帯をより短い単位に分割したセグメントが挙げられる。セグメント区分において、変動地形学及び地質学的視点では、特に断層の形態（分岐、屈曲、ステップ、併走等）が重要視されてきたが、近年では、地震時のすべり量分布とセグメント区分に関連があることも指摘されている<sup>(参20)</sup>。このような情報も活用することで、セグメント区分に基づく活断層の連動性評価の信頼性を向上させることが可能と考えられる。しかし、地震時のすべり量分布は地震活動後にしか把握できない。この解決法の一つとして、事前に把握できる断層沿いの累積変位量から年平均の変位速度の水平分布を求め、地震時のすべり分布の傾向を把握する方法が挙げられる。そこで、本研究では図 1-1 の流れに沿って、変動地形学的調査、地質調査及び地球物理学的調査に基づいた活断層の連動性を総合的に評価するための知見を蓄積した。以下では、そのうち、セグメント区分とそれに基づく活断層の連動性の設定に係る不確実さを考慮する際に参照できる情報として、特に評価が困難である横ずれ断層の累積変位量から、変位速度の分布を評価する事例を示す。

### (2) データ収集及び変位量計測方法

評価対象は兵庫県から岡山県にかけて分布する山崎断層帯主部のうち北西部（大原断層、土万断層、安富断層及び暮坂峠断層から構成され、それぞれがセグメントに相当する。2.4 図 1-7 参照）であり、北西部全体が一括で連動し、868 年の播磨国地震（M7.1）を発生させたと推定されている<sup>(参21)</sup>。これら 4 つのセグメント沿いの河川の屈曲量、河川上流長さ、上流面積等について、航空レーザ計測に基づくデジタル標高モデル（以下「DEM」という。）データを用いて計測した。

河川の屈曲等に関する地形の計測においては、基準とする地形を明確にし、河川の屈曲量、河川を形成する小河川の上流域の河川長及び面積等を計測した。実際の計測では基図として、国土地理院発行の 1/25,000 地形図を用いるとともに、前述の DEM データを基に作成した 1/25,000 地下開度図、1/25,000 斜度図を使用した。結果として地下開度図は河川流路、斜度図は尾根が強調されるため、上流域の河川長の計測には地下開度図を、上流域の面積の計測は斜度図を中心に使用し、立体図（アナグリフ）を用いて立体視しながら河川及び尾根の分布形状を抽出した<sup>(参22)</sup>。また、得られた結果を地理情報システム（以下「GIS」という。）へ移行することで計測を行った。作業の流れを図 1 2 に示す。

### （3）変位量分布の結果及び変位速度の推定

前述の 4 つのセグメントについて、従来の考え方により断層の長さ方向の累積変位量を調査した。累積的な活動に伴い屈曲したと考えられる河川の屈曲量（図 1 3）に基づき、各セグメントに沿った変位量分布を調査した結果、ばらつきが大きいこと、大原断層及び土万断層の屈曲量は、安富断層及び暮坂峠断層の屈曲量に比較して大きく、約 2 倍程度の値を示すことが分かった（図 1 4）。この結果からは、大原断層及び土万断層側から、安富断層及び暮坂峠断層側への連動可能性については否定的な情報となる。

一方、地震時のすべり分布の傾向を把握するための新たな考え方として、屈曲量から、年平均の変位速度の水平分布を推定する手順を検討した。横ずれ断層による河川の屈曲は、過去数十万年間に渡って断層による変位が蓄積した浸食地形であり、浸食速度は場所ごとに異なっている（地質、水系等の違いによる）。上述の変位量分布には様々な浸食速度をもつ屈曲量データが含まれており、これが変位量分布のばらつきの大きな要因となっていると考えられる。そこで、このばらつきを軽減するため、浸食速度が速い河川は流域面積が広くなるという考えのもと、データ間の屈曲量を上流域の面積（図 1 3）で除した（標準化した）屈曲率を求めた。

標準化した屈曲量データのセット（屈曲率）を変位速度に変換するためには、年代学的検討を行う必要がある。ただし、谷の屈曲量が計測できる活断層周辺では、既存の文献資料によっても低位段丘を除けば年代値を得ることができず、野外踏査においても、活断層近傍の段丘面の年代を示す試料を直接得ることは困難であることが分かった。そこで、累積変位を受けている段丘面のおおよその年代を踏まえた検討を行った。具体的には、高位段丘面を刻む谷に屈曲がある地域（大原断層北西端から約 20km 南東に位置）に着目し、屈曲前の河川及び高位段丘面の位置を復元した。

図 1 5 に、2 つの時期（ステージ I 及びステージ II）の河川及び高位段丘面の位置の復元図を示す。高位段丘面を刻む谷の年代は高位段丘面の推定年代<sup>(参23)</sup>から 20～50 万年前以降と考えられる。ステージ I は河川 2 と河川 b を連結した復元図であり、変位量は約 40m である。高位段丘面が変形していることから、少なくともこの時期以前に高位段丘面が形成されたと推定できる。また、ステージ II は河川 3 と河川 d を連結した復元図であり、変位量

は約 110m である。河川 1 及び河川 2 の下流が閉塞していることから、高位段丘面の構成層が堆積中であり、高位段丘面の形成前の状況を示していると推定できる。ステージ I 及びステージ II の復元図から平均変位速度を求めると、それぞれ 0.1-0.2mm/yr 及び 0.2-0.6mm/yr と計算される。上記の通り、高位段丘面はステージ I 以前、かつステージ II 以降に形成されたと考え、代表地点における変位速度を約 0.2mm/yr と見積もった。

これらの情報を用いて屈曲量から変位速度を推定した結果、評価対象とした 4 つのセグメントの変位速度は互いに大差ないものとなった (図 16)。この結果は、これらの断層の活動性が類似のポテンシャルを有していることを示し、互いに連動する可能性が高いことも示唆している。この手順は、横ずれ断層の変位速度の分布パターンを定性的に示す手順としてはある程度の妥当性を保つと考えられるが、以下のことに留意する必要がある。

各データのばらつきについては、DEM の精度のほか、屈曲量を上流域面積で標準化する際に、地域ごとの構成地質の違いに応じた浸食抵抗の差や河川系の違いに応じた流量の差が、上流域面積に影響を与えていることが主な要因と考えられる。特に安富断層及び暮坂峠断層において変位速度が大きい地点については、いずれも流域面積が小さく、また、空中写真から作成された DEM により地形の計測を実施していることから、屈曲量の誤差が大きくなっている可能性がある。本手順の適用に当たっては、これらの効果を考慮する必要がある。また、変位速度の推定に当たっては、段丘面のずれ量とその年代の検討ができる地点が限られているため、精度向上に限界があること、さらに、年代値の誤差が大きく影響するため、特に高位段丘面に対応した中期更新世の火山灰層序学的年代評価手法の更なる高度化が必要である。得られた成果は、活断層帯を対象とした PSHA で構築される LT において、連動性に関する確実なデータが存在しない場合であっても、上記の課題を考慮したうえで、分岐に与える重み付けの際の参考情報として扱われることが期待される。

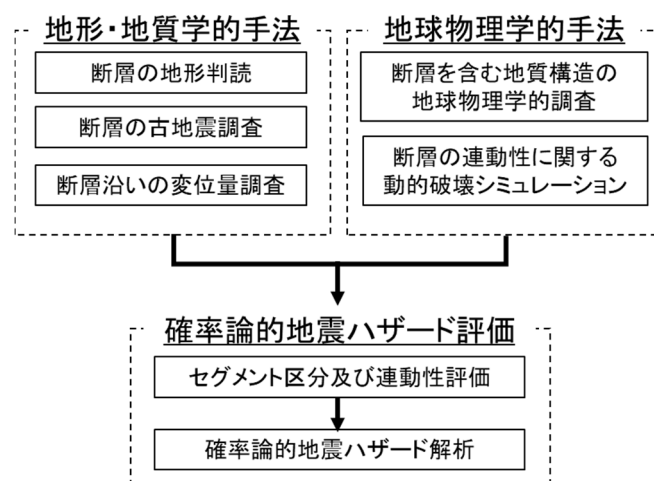


図 1 1 活断層の総合的な連動性評価に関する研究の流れ

Fig. 11 Assessment flow for multiple fault rupture

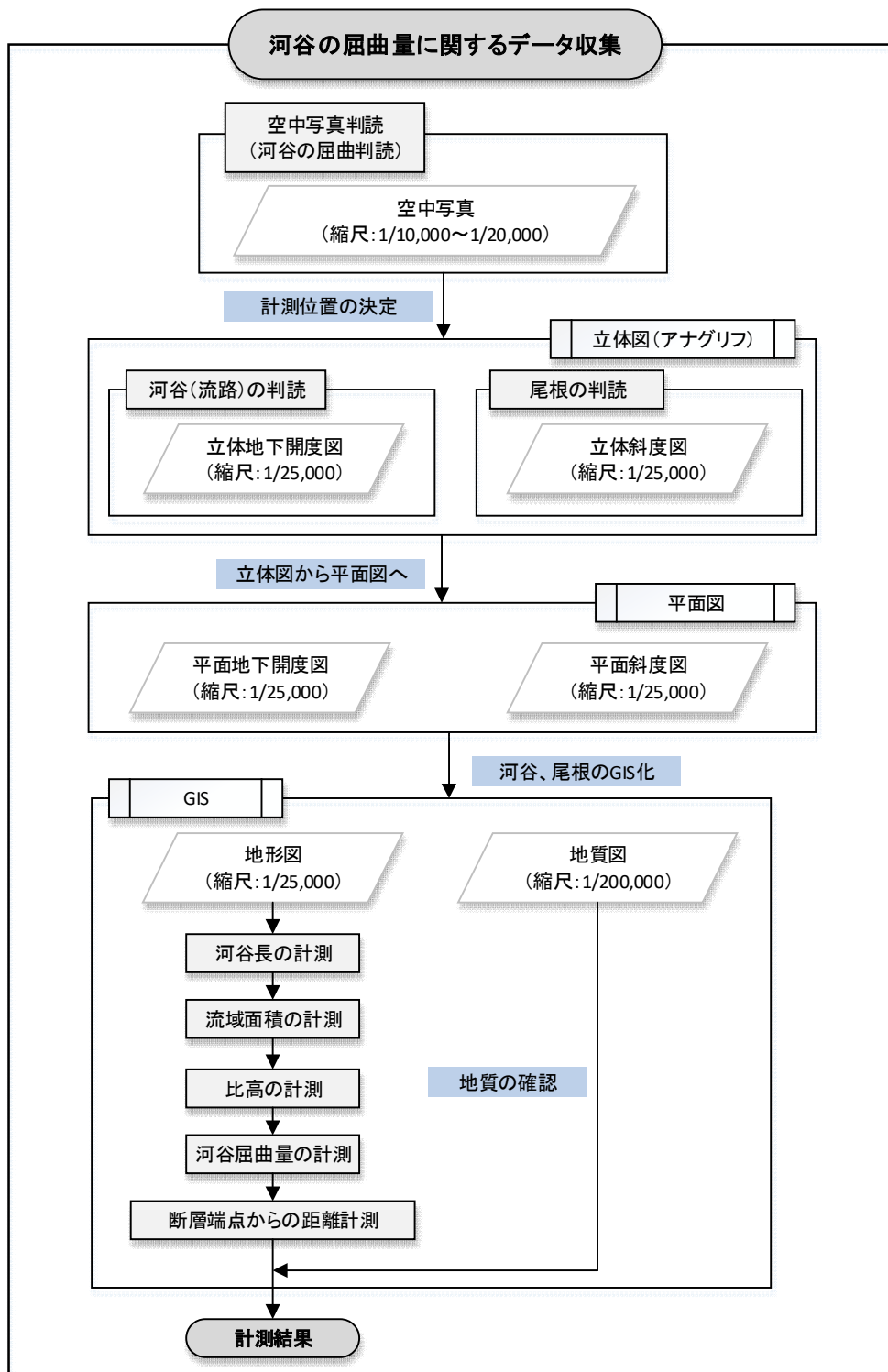


図 1 2 横ずれ断層における河川の屈曲量に関するデータ収集の流れ

Fig. 12 Data acquisition procedure of bend distance measurement of stream crossing strike-slip fault

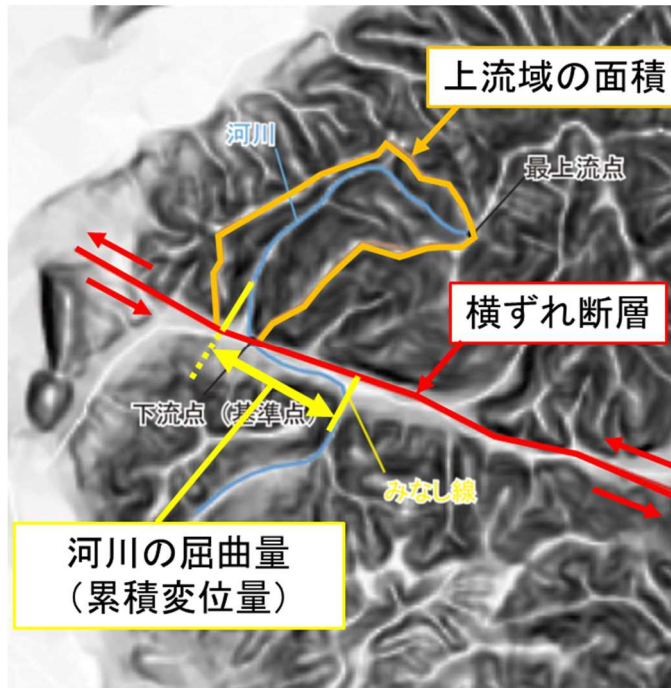


図 1 3 横ずれ断層における河川の屈曲と計測例

Fig. 13 Example of bend distance measurement of stream crossing strike-slip fault

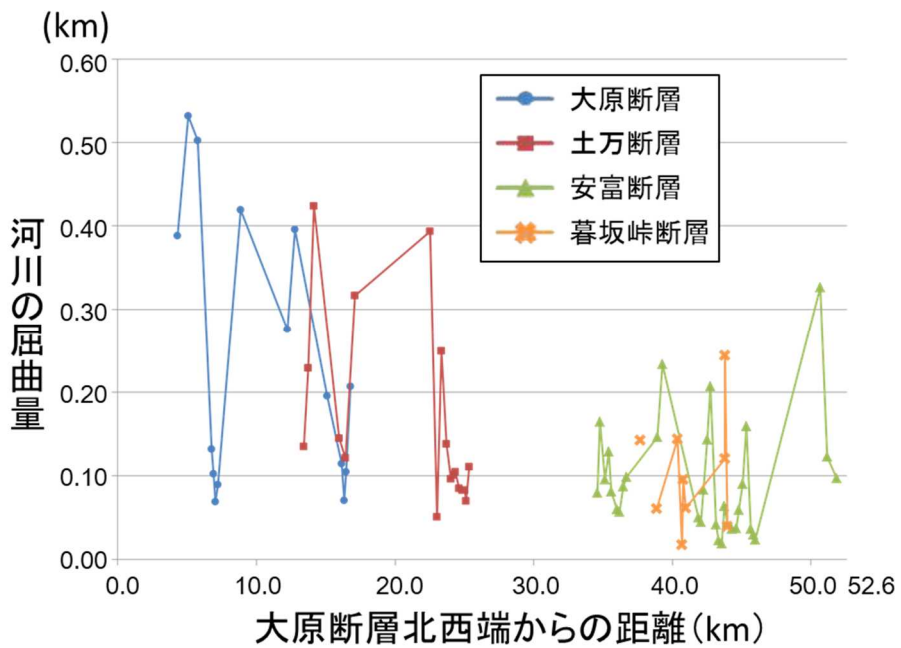


図 1 4 断層沿いの屈曲量測定結果

Fig. 14 Bend distance of stream crossing strike-slip fault



ステージ I の屈曲量復元図

ステージ II の屈曲量復元図

図 15 断層沿いの河川の復元例

大原断層北西端から約 20km に位置。

地図は、国土地理院発行の 2 万 5,000 分の 1 地形図を利用して作成。

Fig. 15 Reconstructed stream crossing strike-slip fault

This area is located about 20 km from northwestern edge of Ohara Fault. Base maps are applied from GSI 1:25,000 topographic map.

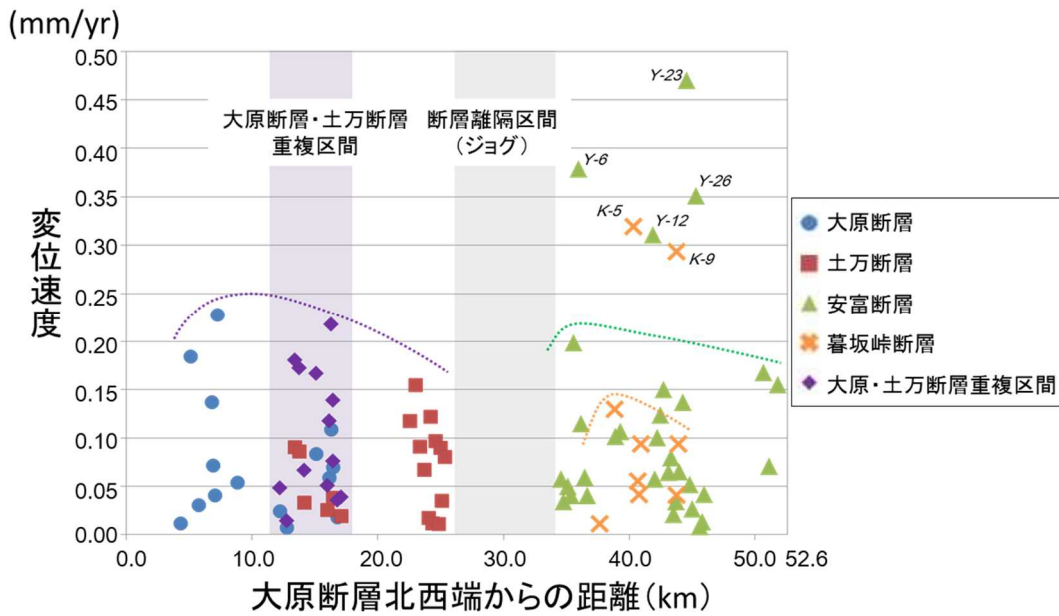


図 16 断層沿いの屈曲量から推定した平均変位速度

Fig. 16 Mean slip rate based on bend distance of stream crossing strike-slip fault

## 2.4 震源断層モデルの不確実さ要因の整理・評価に関する検討

### (1) はじめに

PSHA を対象とした地震動評価では、震源断層モデルの不確実さの取り扱いにより地震動の超過確率の評価が大きく変わることがあるため、不確実さの要因を特定し、それらを設定する際に留意すべき項目を整理することが重要である。本研究では一般的に用いられている距離減衰式による PSHA において、震源断層モデルの設定で生じる不確実さ要因に特化し、PSHA の試解析を実施した。その上で、PSHA の結果へ与える影響の大きい不確実さ要因の抽出を行い、これらを整理した資料に基づいて専門家へのヒアリング等を実施し、LT の分岐項目の設定に当たっての留意点について整理した。

### (2) 連動破壊シナリオが PSHA に与える影響の定量評価

表 4 に LT の分岐項目の設定に当たっての留意点の一覧を示す。震源断層モデルの設定で生じる不確実さ要因は多岐にわたるが、このうち、連動破壊シナリオ及びその平均活動間隔の不確実さは、PSHA への影響が特に大きいものの一つである。基準地震動の検討においては、地震動が最も大きくなるような連動破壊シナリオが重要になるが、確率論的地震ハザードで着目する地震動の年超過確率の算定に当たっては、それぞれの連動破壊シナリオが発生する確率が地震動の年超過確率に影響を及ぼすため、その影響を定量的に評価しておく必要がある。本研究では、連動破壊シナリオ及びその平均活動間隔の不確実さについて、山崎断層帯を例とした PSHA の詳細解析によりこれらの不確実さが年超過確率に与える影響を定量的に把握した。さらに、LT の分岐項目の検討に資する基礎資料とした。

図 1 7 は山崎断層帯の 3 つの断層からなる断層帯の活動シナリオ (Case1~3) と、各活動シナリオに対応する各断層の平均活動間隔を LT の分岐項目として設定した例である。検討対象とした断層帯及び作成した LT を図 1 7(a)に示す。ここで、それぞれの断層帯の活動シナリオについて、地震規模は断層長  $L$  (km) と地震規模  $M_j$  の関係<sup>(参2.4)</sup>に基づく式 (1) により算定した。

$$\log_{10} L = 0.6M_j - 2.9 \quad (1)$$

また、地震発生間隔 ( $T$ ) は Case1 については地震調査研究推進本部の長期評価結果を用いたが、Case2 及び Case3 については長期評価結果には示されていないため、奥村・石川 (1998)<sup>(参2.5)</sup>により与えられる活断層の活動度に基づいた平均変位速度  $V_m$  (m/yr)、断層長から評価される地震規模  $M_j$  及び 1 回の活動による変位量  $D$  (m) の関係<sup>(参2.4)</sup>に基づく式 (2) から算定した。

$$\log_{10} D = 0.6M_j - 4.0 \quad (2)$$

$$T = D/V_m \quad (3)$$

ここで  $V_m$  は山崎断層帯の活動度を参照し、奥村・石川 (1998)<sup>(参2.5)</sup>に基づき 0.5mm/yr とした。

さらに、地震動は上記の断層長から算定した地震規模を用いて、司・翠川（1999）<sup>(参26)</sup>に基づき地盤上の最大加速度を推定した。このようにして算定した各活動シナリオのハザード曲線を図17(b)に示す。Case1は3つの断層が同時活動する活動シナリオで、発生する最大加速度（PGA）は最も大きい。Case2は3つの断層が個別に活動する活動シナリオで、Case1に比べ発生する最大加速度は小さくなるが、活動間隔は短くなる活動シナリオである。Case3は一部の断層が同時活動する活動シナリオである。Case1とCase2のハザード曲線の比較から、1,500Gal程度以下の範囲では、個別活動シナリオが同時活動シナリオの年超過確率を上回ることが分かる。つまり、通常、基準地震動は最大加速度が最大となる活動シナリオに対応しているが、PSHAにおいては、基準地震動を決める活動シナリオよりも小さい最大加速度となる活動シナリオの方が、重要となるケースがあることを示している。本例によりPSHAにおいては個別活動シナリオが同時活動シナリオより重要になる評価点が存在することが把握された。ただし、本例は図17の解析地点1における1評価点のみの結果であるため、次に、ハザード曲線に影響を与える解析地点と断層帯の位置関係について把握することを目的として、断層周辺の解析地点におけるPSHAについて評価した。

### （3）連動破壊シナリオがPSHAに与える影響の面的評価

解析地点1についての例を（2）に示したが、地震ハザード曲線は解析地点と断層帯の位置関係に依存するため、断層周辺の解析地点におけるPSHAについて評価しておくことも重要である。そこで、本項では断層周辺の地表面上でのPSHAを算定し、その結果について示す。

図18(a)及び(b)は活動シナリオCase1及びCase2に対して、最大加速度1,000Galの超過確率の分布を示しており、いずれの活動シナリオについてもほぼ同様の分布形状となる。図18(c)に示す超過確率の比率（Case2に対するCase1の比）から、断層近傍では3断層が個別に活動する場合（Case2）の超過確率が高く、この領域では個別活動の影響が重要になる。一方、断層から離れるに従って、3断層が連動する場合（Case1）の超過確率が高く、連動の影響が重要になる。また、50年間超過確率が $10^{-4}$ に相当する最大加速度についてCase1とCase2の比（Case1/Case2）を図18(d)に示す。本図は約1万年に1回の頻度で発生する地震動の大きさを3断層の個別活動と連動について比較したものに相当するが、最大加速度は断層近傍では個別活動の場合により大きくなり、断層から離れるに従って、連動の場合に大きくなるという結果が得られた。

以上に示したようにPSHAに大きな影響を与える要素うち、本例では表4の連動シナリオと活動間隔について検討し、評価地点と断層との位置関係も重要になることが明らかになった。

以上のように、本研究では、国内外の文献調査、PSHAの試解析の結果及びこれらを整理した資料に基づいた専門家へのヒアリング等により、LTの分岐項目の設定に当たっての留意点について整理した。整理した留意点は定性的な記載となっているが、連動破壊シナリオ

及びその平均活動間隔の不確実さによる PSHA への影響については、具体的な解析事例を提示した。PSHA の妥当性を評価する観点から、LT の分岐項目については、表 4 に示す事項に留意して、設定プロセスを確認することが重要である。中でも、連動破壊シナリオ及びその平均活動間隔については、その不確実さが適切に評価されていることを確認することが重要であり、本解析事例はその参考となるものである。

表 4 ロジックツリーの分岐項目の設定において留意すべき事項

Table.4 Items for examination of branch of logic tree

<p><b>確率論的地震ハザード評価における不確実さの分類(偶然及び認識)の考え方</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・専門家の明確な意識による判断がなされているか</li> <li>・様々なモデルによる試行及び比較により改善するプロセスがとられているか</li> </ul>
<p><b>確率論的地震ハザード評価で用いるパラメータ及び方法論の設定根拠となる情報</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・情報及び評価法に用いたデータベースが整備されているか</li> <li>・震源パラメータの評価及び地震動評価のそれぞれについて、複数の専門家の意見を参考に作業(裏付けデータ、除外根拠の収集等)が行われているか</li> </ul>
<p><b>ロジックツリーの作成及び重み付けのプロセス</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・専門家レベルの選定、専門家の選定、ロジックツリーの作成及び重み付けのプロセスが明確にされているか</li> <li>・感度解析の反復により評価結果に効くパラメータに対し、詳細な分岐を与えているか</li> <li>・重み付けの根拠及び特定分野の専門家の意見が適切に反映されているか</li> </ul>
<p><b>複数の活断層の連動破壊シナリオ及びその平均活動間隔の設定</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・固有地震モデルにとられすぎているか(低頻度な規模の大きな地震に比べ、高頻度な規模の比較的小さな地震について着目する地震動の年超過頻度が大きくなる場合がある)</li> <li>・十分なトレンチ調査が実施されているか、また活動履歴の評価が調査位置に依存している可能性がないか</li> </ul>
<p><b>地震規模の評価式の選択基準及び長大な内陸活断層の地震規模評価式</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・適用範囲を考慮し、最新の知見を取り入れて設定されているか</li> <li>・地震規模評価式は断層長さの他、断層面積などに基づくものなどがあり、特徴も異なることから一つの式に絞らず、複数の式がロジックツリーの分岐に含まれているか</li> <li>・長大な内陸活断層についても数は限定されるが、複数の式が考慮されているか</li> </ul>
<p><b>考慮すべき距離減衰式(地震動予測)及びその適用性のチェック方法</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・複数の距離減衰式がタイプ別に分類され、代表的な式がロジックツリーの分岐として設定されているか</li> <li>・設定する距離減衰式に当該サイトの補正項が作成されているか</li> <li>・距離減衰式のばらつきを考慮した地震動の計算で設定する上限の打ち切りの指標及びばらつきが示されているか</li> </ul>

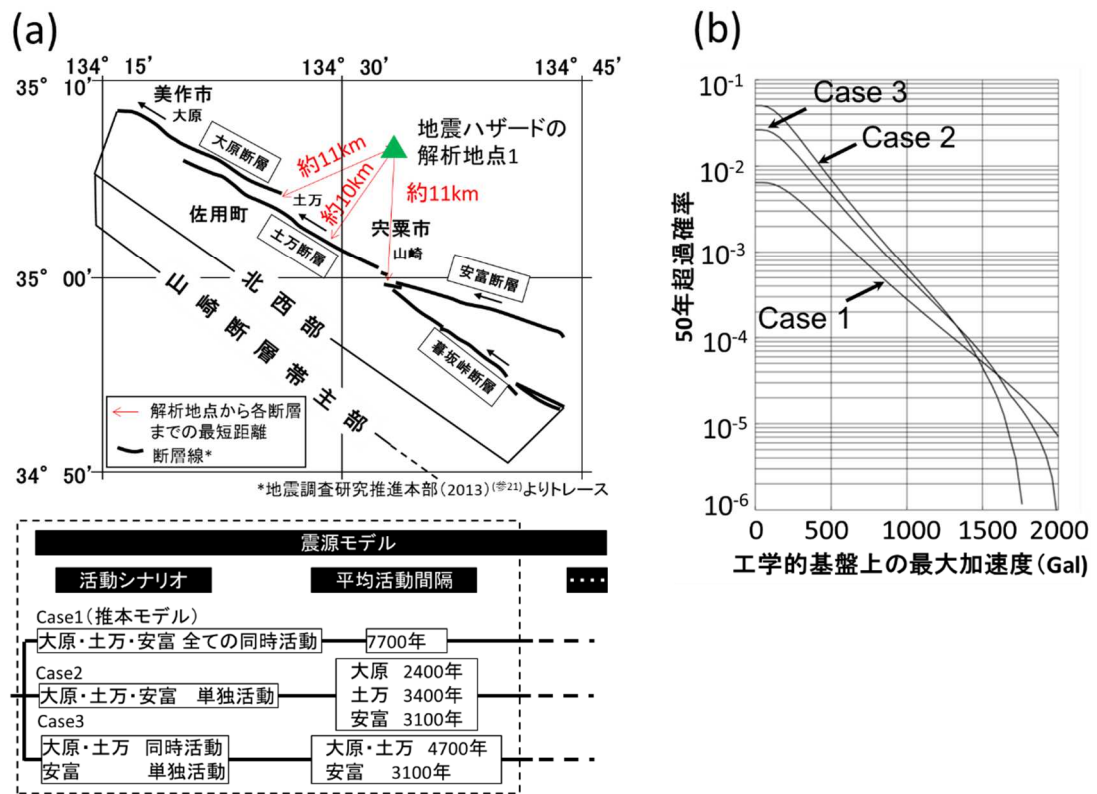


図 17 山崎断層帯を対象とした地震ハザードの検討例

(a)検討対象とした断層帯及びロジックツリー、(b)各活動シナリオの地震ハザード曲線。

儘田ほか (2015) (参27) を一部改変した。

Fig. 17 Surface traces of faults focused on seismic hazard analysis and logic tree for the analysis (a), and seismic hazard curves at site 1 (b). Modified from Mamada et al. (2015)<sup>(Ref.27)</sup> in part.

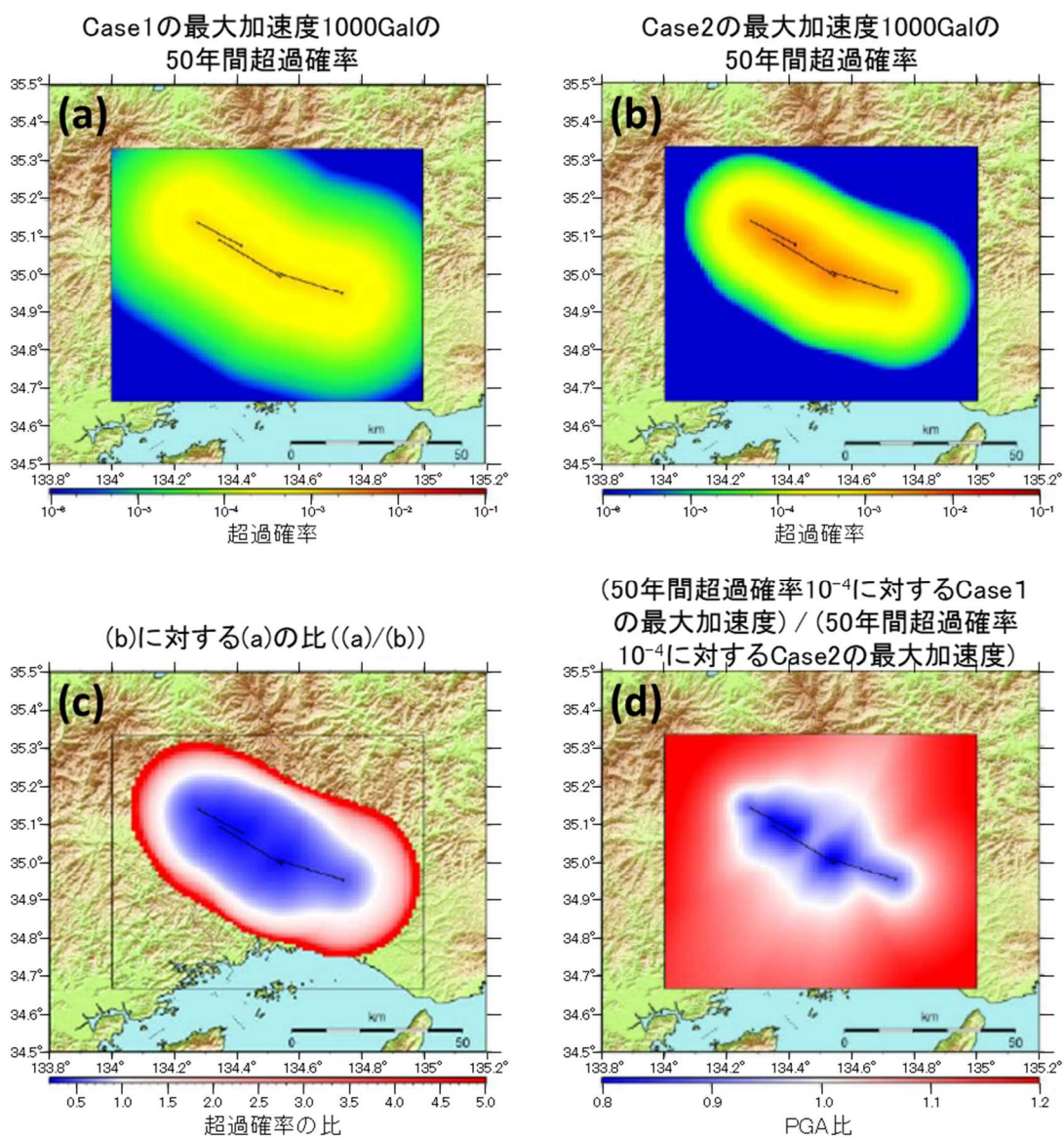


図 18 2つの活動シナリオによる最大加速度 1,000Gal の超過確率と超過確率の比及び  
超過確率  $10^{-4}$  に対する PGA 比の分布

内田ほか (2017)<sup>(参28)</sup> を一部改変した。

Fig. 18 Distribution of probability exceedances (PGA of 1,000Gal) for two fault rupture scenarios,  
their ratio and ratio of PGA for two scenarios with probability exceedance of  $10^{-4}$

Modified from Uchida et al. (2017)<sup>(Ref.28)</sup> in part.

## 2.5 本震・余震型地震の地震ハザード評価手法への適用性の検討

### (1) はじめに

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地震に伴って発生した余震のうち、女川原子力発電所では平成 23 年 4 月 7 日宮城県沖の地震において、自由地盤観測点（解放基盤表面相当位置）における応答スペクトルが基準地震動  $S_s$  を一部の周期帯で超過した<sup>(参2.9)</sup>。一般的には、確率論的手法を用いた地震リスク評価における地震ハザード評価では、余震は考慮されていない。しかしながら、M9 クラスの超巨大地震に伴う余震では、余震の発生位置、規模及び観測地点の地盤状況によっては本震と同等以上の地震動を生じる可能性があるため、余震による地震ハザードへの影響を把握しておく必要がある。そこで、本震による地震動の超過頻度及び本震発生に伴う従属事象としての余震による地震動の条件付き超過頻度を合わせて考慮した超過頻度（以下「時系列ハザード」という。）の評価手法を用い、東北地震を例に、余震が時系列ハザード与える影響について検討した。以下(2)及び(3)では、東北地震の余震データを用いたハザード解析及び東北地震の余震データを用いないハザード解析についてそれぞれ示し、(5)において、これらにより予測された地震動の超過頻度を(4)に示す観測地震動記録に基づく超過頻度と比較した。最後に(6)において東北地震を対象とした時系列ハザードについて検討する。ここで、(2)及び(3)の解析は東北地震の発生頻度を考慮しない余震の発生頻度であり、(6)の解析は東北地震の発生頻度を考慮した余震の発生頻度である。

### (2) 東北地震の余震データを用いたハザード解析

本研究の解析フローを図 19 に示す（図中の①～④の手順は本節の文中①～④に対応する）。まず、東北地震後に発生した余震の規模別発生頻度をモデル化し、余震による地震動の超過頻度を計算した(①)。ここでは、東北地震の余震の発生領域を参考に、東北地震の震源域を決定し、気象庁震源カタログ（一元化震源データ）に基づき、震源域で発生した余震の規模別発生頻度を Gutenberg-Richter の式（以下「GR 則」という。）でモデル化した。なお、余震の発生期間は本震発生から 1 年間に発生したものを対象とした。地震動の大きさは太平洋沿岸に位置する防災科学技術研究所の強震観測網（K-NET 又は KiK-net）<sup>(参2.6)</sup> の 4 地点（KiK-net 六ヶ所、K-NET 牡鹿、K-NET 広野及び KiK-net ひたちなか）を対象（図 20）に司・翠川（1999）<sup>(参2.6)</sup> の方法により計算した。算定したハザード解析結果は、後述する(5)において(3)及び(4)により得られた結果と比較して示す。

### (3) 東北地震の余震データを用いないハザード解析

M9 クラスの本震の発生前に、その本震後に発生する余震の規模別発生頻度及び余震数の経時推移（以下、「余震活動特性」と呼ぶ）を予測する目的で、東北地震以前に発生した M6 以上の本震を対象に本震－余震の余震活動特性を分析した。これらの分析結果に基づき、東

北地震に伴う余震活動特性を予測し、東北地震後に発生する余震による地震動の超過頻度を推定した。

本震発生後からの経過日数に伴う余震の発生個数の予測式(改良大森式)及び余震の規模別発生頻度の予測式(GR式)を組み合わせることにより、本震発生後からの日数に応じて、ある任意の地震規模を持つ地震の発生数の推定が可能になる<sup>(参31)</sup>。本推定法を参考に、②では、東北地震発生前の日本海溝沿いで発生した余震について分析し、本震からの経過日数に依存する規模別発生数の予測式を作成した(以下、「余震発生頻度予測式」という)。具体的には、東北地震の本震発生前に日本海溝沿いで発生した Mj6.0 以上の地震を本震として抽出し、本震発生から 90 日以内にそれぞれの地震の震源域で発生した Mj4.0 以上の地震を余震として抽出した。ここで、抽出した本震—余震の地震活動は 1923 年～2011 年までに発生した 40 個であり、本震の規模は Mj6.0～7.9 である。また、それぞれの本震について抽出された余震について、改良大森式及び GR 式による回帰分析を実施し、それぞれの平均、標準偏差を算定した。これらに基づき余震発生頻度予測式を作成した。地震動の評価地点及び計算法は①と同じである。

#### (4) 観測地震動記録に基づく年超過頻度の算出

図 20 に示した 4 地点では地震動の観測記録が得られており、対象とする期間中の観測記録の最大加速度値を読み取り、その期間中に、ある加速度を超過する回数を数えることにより、それぞれの地点での最大加速度の超過頻度を算定することができる。ここでは東北地震後 1 年間に発生した余震の最大加速度の読み取り値から、1Gal 刻みの地震動の頻度分布図を作成し、1 年間の超過頻度を計算した (③)。

#### (5) 東北地震の余震データを用いたハザード結果と余震データを用いないハザード結果の比較

図 21 には本震発生から 1 年間に発生する余震を対象として、①及び②により求めた余震の規模別発生頻度を用いた、余震による地震動の 1 年当りの超過頻度を示す。ここでは本震の発生頻度は考慮していない。ハザード曲線の解析地点は前述の 4 地点である。いずれの解析地点でも高頻度(おおよそ年 5 回以上)で発生する地震動のハザード曲線は①及び②の方法によらず、ほぼ同様の最大加速度となるが、低頻度(おおよそ年 5 回未満)で発生する最大加速度は②の方法の方が大きく評価される。

また、図 21 中の丸印は観測地震動記録に基づいて算出した解析地点 4 地点における最大加速度の超過頻度(③)である。観測データから求めた最大加速度は高頻度に発生する地震動に対して①及び②により計算されたハザード曲線と調和的である。

(6) 日本海溝で発生する東北地震型の震源モデルによる時系列ハザード

日本海溝で発生する東北地震型の震源モデルと②で作成した余震発生頻度予測式に基づく余震発生モデルを利用することにより、本震発生後の経過時間に依存した余震の規模別発生頻度を考慮した時系列ハザードの評価手法を用いて、余震が地震ハザードに与える影響を検討した(④)。本解析は、あらかじめ震源モデルが想定されており、その震源域で発生する本震—余震型の地震活動が既知であるという条件下で、その本震規模を超える地震とその余震による地震動の超過頻度を予測することを目的とした。

④では時系列ハザードの解析のために、本震と余震の地震活動モデルを作成した。まず、本震の地震活動モデルでは、既存の評価<sup>(参32)</sup>を参考に東北地震型の震源モデルを設定し、本震の地震発生確率を東北地震直前までの確率値を与えてモデルを作成した。次に、余震の地震活動モデルは②で作成した余震発生頻度予測式で与えた(図22)。なお、余震発生頻度予測式の作成に用いたデータは、(3)に述べた東北地震型の本震発生前の40個の本震—余震のデータであり、これらに含まれる余震の規模は、Mj6.5以下がほとんどである。よって、Mj6.5以上の規模の余震数は極めて少ないため、Mj6.5以上の余震の発生頻度は外挿することにより推定し、M9クラス相当の本震—余震の地震活動モデルを予測した。外挿により推定した本震発生から1年間に発生する余震の規模別発生頻度の平均値及び平均値から標準偏差分の差分を考慮した予測式を図22の実線及び破線でそれぞれ示す。図22によれば、東北地震で観測された余震の規模別発生数は、M4程度の規模の小さな領域及びM6.5以上の規模の大きな領域で予測式の精度が低下するが標準偏差の範囲内であり、本予測式で余震の規模別発生数をモデル化できると考えられる。

次に、Iervolino et al. (2014)<sup>(参33)</sup>の手法に基づいて最大加速度に対する本震発生から1年間の時系列ハザードの解析を行い、時系列ハザード中の余震の寄与率を求めた。図23にK-NET 牡鹿での解析結果を示す。時系列ハザードと本震のハザードを比較した場合、160Galを超えると時系列ハザードの年超過頻度が相対的に大きくなり、年超過頻度に占める余震による影響(寄与率)は400~1,000Gal程度で25%以上となった。

以上により、M9クラスの東北地震型の時系列ハザードにおいて、本震発生から1年間に発生する余震が時系列ハザードに与える影響について、定量的に把握した。

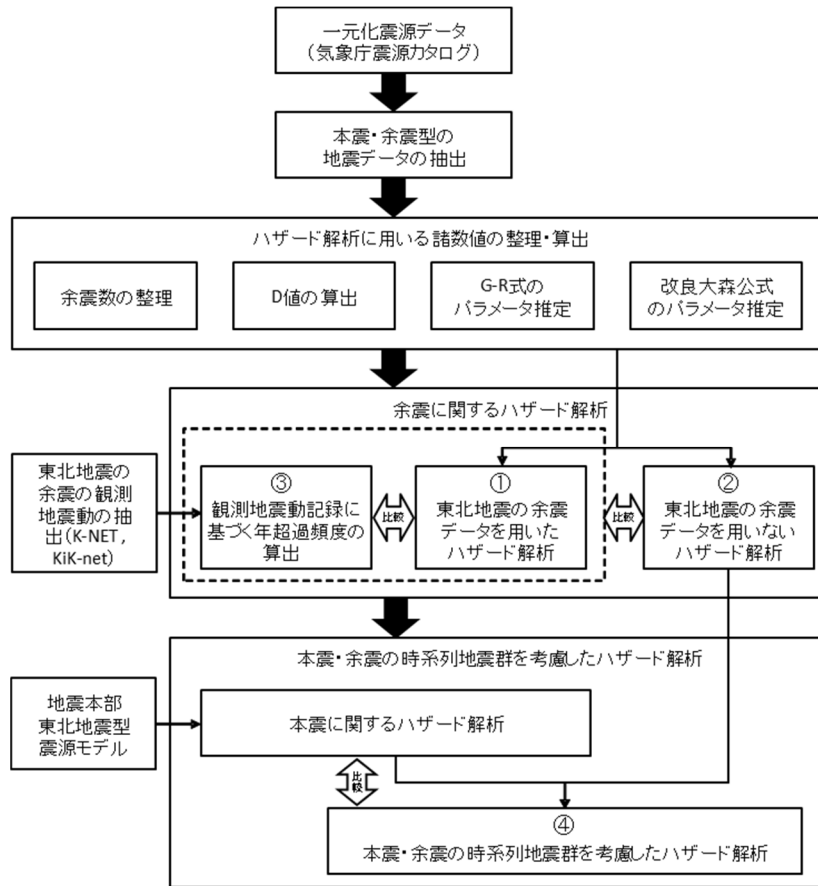


図 19 本震・余震型地震の地震ハザード解析のフロー  
 Fig. 19 Flow for sequence-based probabilistic hazard analysis

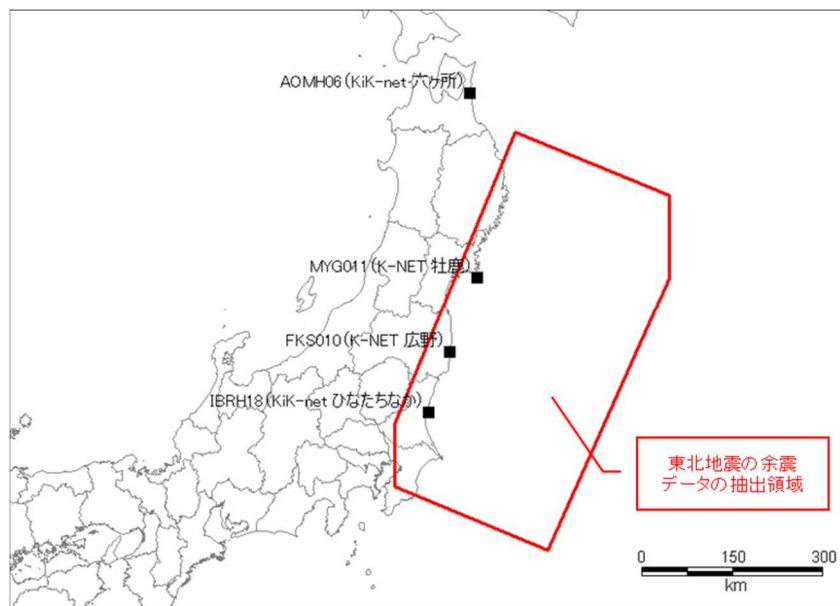


図 20 地震ハザードの解析に用いた評価点  
 Fig. 20 Evaluation points for seismic hazard analysis

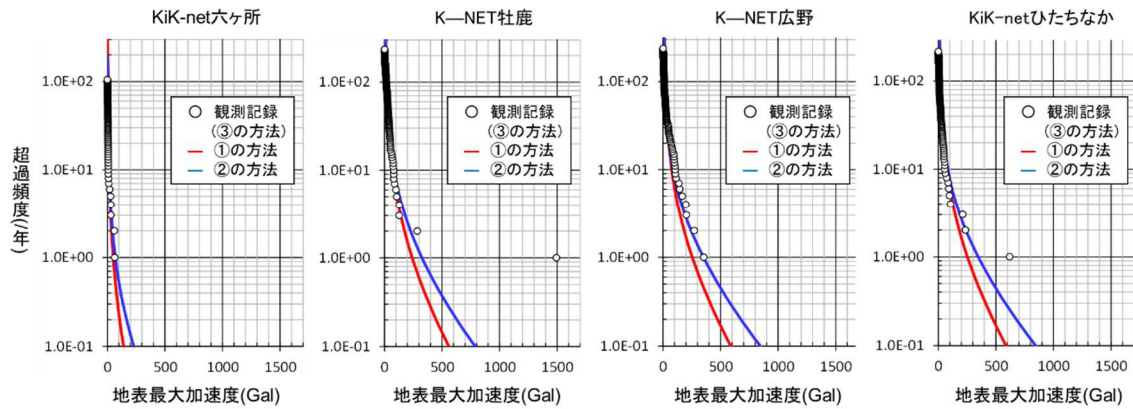


図 2 1 東北地震後の余震規模別発生頻度モデル及び東北地震前の余震から作成した余震発生頻度予測式による地震ハザードの比較

解析地点：KiK-net 六ヶ所、K-NET 牡鹿、K-NET 広野、KiK-net ひたちなか。

Fig. 21 Frequency exceedances of aftershocks at four stations (Rokkasho, Oshika, Hirono and Hitachinaka) calculated based on frequency-magnitude distribution of aftershocks of Tohoku earthquake and statistical distribution expected from aftershocks associated with mainshocks occurring before Tohoku earthquake

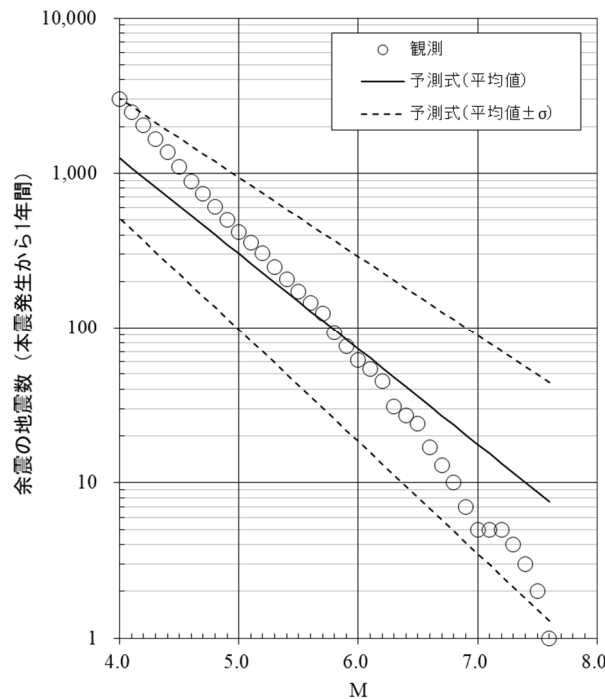


図 2 2 観測された余震数と予測式から求めた余震の発生予測数の比較

Fig. 22 Relation of aftershock number and magnitude based on observation and prediction

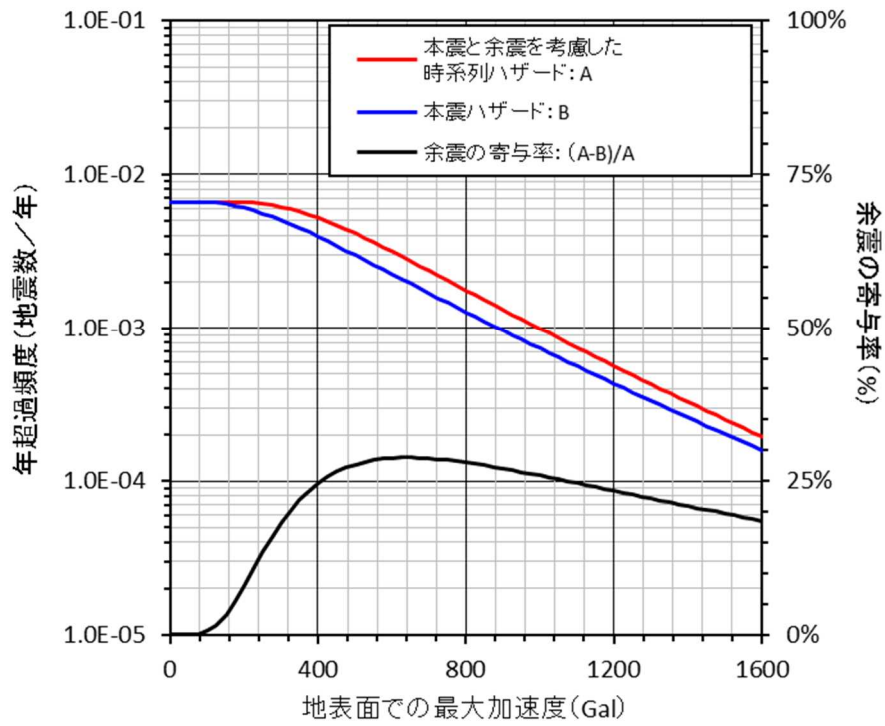


図 23 本震・余震の時系列地震群ハザードと本震ハザードの比較  
(解析地点：K-NET 牡鹿)

Fig. 23 Results of sequence-based and main-shock hazard in terms of PGA at K-NET Oshika

### 3. 結論

#### (1) 成果の要点

本プロジェクトでは、平成 25 年度から平成 28 年度まで実施期間において震源断層評価技術に関する安全研究を実施した。各研究実施項目において以下の成果を得た。

#### ①火山灰層序学的年代評価手法の整備（平成 25~28 年度）

「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に関する知見を蓄積するため、深海底堆積物（ちきゅう C9001C 孔コア）に含まれるテフラの層序を構築した。その結果、複数の後期更新世テフラ及び中期更新世テフラを検出することができた。これらのテフラは、東北地方に分布する火山から噴出したものが多いが、北海道、九州、アジア大陸から噴出したものも含まれ、貴重な時代面となっている。特に C9001C 孔に対して、信頼性の高い年代が、Nh-IV 及び Ks5 によって 2 層準挿入され、C9001C 孔に付帯する酸素同位体層序を参照すると、それぞれ MIS 10d（約 35.7 万年前）及び MIS 12b~12c（43.4~45.8 万年前）に対応する。これらを基に、信頼性の高い最近約 40 万年間の年代モデルが構築されるとともに、WP、ODP794 2H-2-120 及び So-OT の既報年代は高精度に再決定された。これらテフラは断層変位指標の年代決定に有効であり、中期更新世における断層活動評価に活用できる見通しを得た。

#### ②断層破砕物質等を用いた年代評価手法の整備（平成 25~26 年度）

断層の活動性評価に有効な堆積層が欠如している等の理由により活動年代が不明な断層に関し、活断層の活動性を評価する指標の一つとして、断層破砕物質の色彩を用いた評価手法を検討した。断層破砕物質の母岩とみなした試料を用い、温度条件を変えて色彩値の経時変化を計測することにより、色彩値の変化と経過時間の関係を把握した。そして、得られた関係を実際の断層破砕物質の色彩値に適用し、岩石が破砕してからの経過時間を推定することにより相対的な活動性を把握することができた。

#### ③活断層のセグメント区分と連動性の評価手法の整備（平成 25~27 年度）

リスク評価で用いられる地震ハザード評価における確率論的地震ハザード評価では、多様な不確実さを考慮して、LT の分岐を適切に設定することが重要である。そこで、LT の分岐とその重み付けの設定法を整理する観点から、セグメント区分及び連動性を総合的に評価するための知見を蓄積した。その手順のうち、特に評価結果を大きく左右する活断層のセグメント区分とその連動性の評価について、横ずれ断層に沿った河川の屈曲量及び上流域の面積を用いることによって、河川の屈曲率を変位速度に変換する手順の具体的な事例を示すことができた。

④震源断層モデルの不確実さ要因の整理・評価に関する検討（平成 25~28 年度）

確率論的地震ハザード評価で扱う震源断層モデルの設定に伴う不確実さのうち、評価結果への影響が大きい不確実さの要因を文献調査及び試解析に基づき抽出した。抽出された要因について専門家へのヒアリング結果を参考に、LT の分岐項目の設定における留意点として整理した。特に PSHA への影響が大きい活断層の連動と活動間隔の設定については、詳細な解析により設定の違いが PSHA へ与える影響を定量的に把握することができた。

⑤本震・余震型地震の地震ハザード評価手法への適用性の検討（平成 25~26 年度）

巨大地震に伴う余震が地震ハザード結果に与える影響を検討するため、確率論的手法を用いて、本震による地震動の超過頻度と本震発生後の条件付き超過頻度である余震による地震動の超過頻度を合わせた時系列ハザードの評価手法を用い、東北地震の余震等に適用した。その結果、ある観測点で本震から 1 年間に発生する余震を考慮した地震ハザードにおいて、400~1,000Gal 程度の時系列ハザードのうち、余震による影響は 1/4 程度であることがわかった。これにより、巨大地震に伴う余震の影響（年超過確率に占める余震による寄与率）の大きさを定量的に把握することができた。

（2）目的の達成状況及び成果の活用等

上記のとおり平成 25 年度から平成 28 年度までの実施期間の目的を全て達成した。研究成果は、原子力規制委員会の適合性審査において活用された。

断層破碎物質等を用いた年代評価手法の整備については、平成 27 年度以降、継続プロジェクト「断層破碎物質を用いた断層の活動性評価手法に関する研究」において得られる成果と合わせ、NRA 技術報告として取りまとめる予定であり、今後の適合性審査において活用が期待される。

## 参考文献

- (参 1) 地震調査研究推進本部、「活断層の長期評価手法」報告書（暫定版）、117p、地震調査研究推進本部、平成 22 年 11 月
- (参 2) 宮川ちひろ、吉川周作、池田善考、神戸市中央区港島ポートアイランド、ボーリングコアの中・上部更新統火山灰層序、地球科学、Vol.50、456-465、平成 8 年
- (参 3) 町田 洋、新井房夫、新編火山灰アトラス「日本列島とその周辺」、336p、東大出版会、平成 15 年 9 月
- (参 4) 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 Vol. 23, 63-79, 2014, June
- (参 5) 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, Vol. 40, 129-145, 2017, November
- (参 6) Matsu'ura, T., and Komatsubara, J., Detection of Late Pleistocene tephros and cryptotephros using major element chemistry of glass shards from Chikyu C9001C cores, NW Pacific Ocean, JAMSTEC Research and Development, Vol. 26, 1-20, 2018, March
- (参 7) Lisiecki, L.E., Raymo, M.E., A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}\text{O}$  records, Paleoclimatology, Vol. 20, PA1003, 2005, January
- (参 8) Domitsu, H., Nishi, H., Uchida, J., Oda, M., Ogane, K., Taira, A., Aoike, K. and Shimokita Research Group, Age model of core sediments taken by D/V CHIKYU during the shakedown cruises off Shimokita Peninsula, Kaseki Foss. Palaeontol. Soc. Jpn. Issue 87, 47-64, 2010, March
- (参 9) 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, Newslett. Stratigr., Vol. 44, 113-122, 2011, June
- (参 1 0) Sato, T., Chiyonobu, S. and Hodell, D.A., Data report: Quaternary calcareous nannofossil datums and biochronology in the north Atlantic Ocean, IODP site U1308, In: Channell, J.E.T., Kanamatsu, T., Sato, T., Stein, R. and Alvarez Zarikian, C.A. (Eds.), Malone, M. J., the Expedition 303/306 Scientists (Eds.), Proceed. Integrated Ocean Drilling Program, 303/306. College Station, TX., 2009, November

- (参 1 1) Thierstein, H.R., Geitzenauer, K.R., Molfino, B., and Shackleton, N.J., Global synchronicity of late Quaternary coccolith datum levels: Validation by oxygen isotopes, *Geology*, Vol. 5, 400-404, 1977, July
- (参 1 2) Raffi, I., Backman, J., Fornaciari, E., Palike, H., Rio, D., Lourens, L. and Hilgen, F., A review of calcareous nannofossil astrobiochronology encompassing the past 25 million years, *Quat. Sci. Rev.*, Vol. 25, 3113-3137, 2006, December
- (参 1 3) 宮下由香里、小林健太、亀井淳志、伊藤順一、間中光雄、福士圭介、断層破碎物質を用いた断層活動性評価手法の開発 (1) : 鳥取県西部地域における断層岩の産状、日本地球惑星科学連合 2011 年大会予稿集、SSS032-P01、平成 23 年
- (参 1 4) 間中光雄、福士圭介、宮下由香里、伊藤順一、渡部芳夫、小林健太、亀井淳志、2000 年鳥取県西部地震の余震域と非余震域に分布する断層ガウジの比較、地質学雑誌、Vol. 118、459-475、平成 24 年 8 月
- (参 1 5) 内田淳一、宮脇昌弘、断層ガウジの色彩に基づく断層の相対的な活動性推定手法、歴史地震、no. 31、219、平成 28 年 3 月
- (参 1 6) 深部地質環境研究コア編、概要調査の調査・評価項目に関する技術資料 ー立地要件への適合性とその根拠となる調査結果の妥当性ー、地質調査総合センター研究資料集、no.560、産業技術総合研究所地質調査総合センター、平成 24 年 3 月
- (参 1 7) 地震調査研究推進本部、西山断層帯の長期評価 (一部改訂) について、32p、地震調査研究推進本部、平成 25 年 2 月
- (参 1 8) 原子力安全基盤機構、活断層の位置・形状評価及び活動性評価に関する手法の整備、73p、原子力安全基盤機構、JNES-RE-2013-2040、平成 26 年 2 月
- (参 1 9) 日本原子力学会、原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準 : 2015、1012p、日本原子力学会標準、AESJ-SC-P006:2015、平成 27 年 12 月
- (参 2 0) 杉山雄一、活断層情報の現状とその活用法ー強震動予測への貢献の観点からー、第 31 回地盤震動シンポジウム、5-14、平成 15 年 11 月
- (参 2 1) 地震調査研究推進本部、山崎断層帯の長期評価 (一部改訂) について、48p、地震調査研究推進本部、平成 25 年 7 月
- (参 2 2) 横山隆三、白沢道生、菊池 祐、開度による地形特性の表示、写真測量とリモートセンシング、Vol. 38、no. 4、26-34、平成 11 年 9 月
- (参 2 3) 小池一之、町田 洋編、日本の海成段丘アトラス、122p、東京大学出版会、平成 13 年 6 月
- (参 2 4) 松田時彦、活断層から発生する地震の規模と周期について、地震 第 2 輯、Vol. 28、269-284、昭和 50 年 10 月

- (参 2 5) 奥村俊彦、石川 裕、活断層の活動度から推定される平均変位速度に関する検討、土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集、第 I 部 (B)、554-555、平成 10 年
- (参 2 6) 司 宏俊、翠川三郎、断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式、日本建築学会構造系論文集、Vol.64、no. 523、63-70、平成 11 年 9 月
- (参 2 7) 儘田 豊、内田淳一、藤田雅俊、確率論的地震ハザード解析におけるロジックツリーの分岐項目の設定に関する検討ー内陸の活断層を対象としてー、日本活断層学会 2015 年度秋季学術大会 講演予稿集、P-13、平成 27 年
- (参 2 8) 内田淳一、儘田 豊、田島礼子、活断層の連動破壊シナリオの設定が確率論的地震ハザード解析に与える影響の検討、日本活断層学会 2017 年度秋季学術大会 講演予稿集、P-8、平成 29 年
- (参 2 9) 原子力安全・保安院、東北電力(株) 女川原子力発電所における平成 23 年(2011 年) 東北地方太平洋沖地震及び 4 月 7 日の地震観測記録のはざとり解析について、地震・津波に関する意見聴取会(第 6 回)、地震・津波 6-4-2、59p、平成 23 年 12 月 9 日
- (参 3 0) 防災科学技術研究所 強震観測網 ( K-NET, KiK-net )、<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/> (参照日：平成 30 年 8 月 23 日)
- (参 3 1) 崔炳 賢、糸井達哉、高田毅士、地震後復旧活動計画のための確率論的余震発生モデルと余震ハザード評価の提案、日本建築学会構造系論文集、Vol.78、no. 690、1377-1383、平成 25 年 8 月
- (参 3 2) 地震調査研究推進本部地震調査委員会、今後の地震動ハザード評価に関する検討～2013 年における検討結果～、27p、平成 25 年 12 月
- (参 3 3) Iervolino, I., Giorgio, M. and Polidoro, B., Sequence-Based Probabilistic Seismic Hazard Analysis, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.104, 1006-1012, 2014, April

## 付 録

- ・用語解説 1 : 地球軌道要素に起因する日射量変化

地球の天文学的要素、すなわち公転軌道の離心率 (約 10 万年周期)、地軸傾斜変化 (約 2.1 万年周期)、自転軸の歳差運動 (約 2.1 万年周期) に起因する日射量変化のこと。

- ・用語解説 2 : 海洋酸素同位体ステージ (Marine isotopic stage、MIS)

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。

- ・岩石の色彩値を用いた年代標準式の導出

反応速度式で示される速度定数  $k_a$  及び  $k_b$  は温度に依存し、一般的にアレニウスの式によって、次式で与えられる。

$$k = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (1)$$

ここで、 $k$ : 反応速度、 $A$ : 頻度因子 (実験的に求まる定数)、 $E$ : 活性化エネルギー (実験的に求まる定数)、 $R$ : 気体定数、 $T$ : 温度 (ケルビン)

両辺の自然対数をとると、次式に変換される。

$$\begin{aligned} \ln k &= \ln A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \\ &= \ln A + \ln \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \\ &= (\ln A) - \frac{E}{RT} \\ \ln k &= \ln A - \frac{E}{RT} \end{aligned} \quad (2)$$

式 (2) は横軸に温度の逆数  $1/T$  を、縦軸に反応速度の対数  $\ln k$  をとり、反応速度をプロットすると、その切片が  $\ln A$ 、傾きが  $-E/R$  となることを示している。そこで、アレニウスプロットにより常温 (15°C) における  $k_a$  及び  $k_b$  を推定した (2. 2 表 3)。

岩石の色彩変化が一次反応であると仮定し、反応によって物質 A が物質 B に変化したとすると、その時の速度式は、 $A \rightarrow B$  として表される。この時、物質 A の濃度を  $[A]$ 、物質 B の濃度を  $[B]$  とすると、この一次反応における反応速度  $V$  は次の式で表される。

$$V = -\frac{d[A]}{dt} = \frac{d[B]}{dt} = k[A] \quad (3)$$

ここで、 $V$ ：反応速度、 $[A]$ ：物質 A の濃度、 $[B]$ ：物質 B の濃度、 $k$ ：速度定数

式 (3) は物質 A が減少する速度と物質 B が増加する速度が等しいことを意味し、その反応速度  $V$  は A の濃度  $[A]$  と速度定数  $k$  を用いて、 $k[A]$  で表される。式 (3) より式 (4) が導き出される。

$$\frac{d[A]}{dt} = -k[A] \quad (4)$$

この微分方程式を、濃度  $[A]$  を左辺に、微小時間  $dt$  を右辺に移項すると式 (5) が導き出される。

$$\frac{d[A]}{[A]} = -k dt \quad (5)$$

ここで、時間  $t$  の間に濃度  $[A]_0$  が  $[A]$  に減少したとすると、両辺を  $[A]_0$  から  $[A]$ 、0 から  $t$  で積分し、式 (6) が導き出される。

$$\int_{[A]_0}^{[A]} \frac{d[A]}{[A]} = -k \int_0^t dt \quad (6)$$

これを解くと、式 (7) となる。

$$\ln\left(\frac{[A]}{[A]_0}\right) = -kt \quad (7)$$

ここで、時間  $t$  における物質 A の濃度  $[A]$  は式 (8) で表される。

$$[A] = [A]_0 e^{-kt} \quad (8)$$

同様に、時間  $t$  における物質 B の濃度  $[B]$  は  $[B] = [A]_0 - [A]$  より式 (9) で表される。

$$[B] = [A]_0 (1 - e^{-kt}) \quad (9)$$

色彩値の変化量が一次反応に従い、 $[B]$  の増加量が色彩値の増加量と対応させることができれば、色彩値  $[B]$  を測定することによって、色彩変化にかかった時間  $t$  を得ることができる。

$$t = \ln\left(\frac{[A]_0}{[A]_0 - [B]}\right) / k \quad (10)$$

このとき、

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [B] = [A]_0 \quad (11)$$

である。式 (11) は、濃度  $[B]$  の飽和量が濃度  $[A]_0$  に等しいことを示している。式 (10) に基づき、 $[A]_0 = a^*_{\max} - a^*_0$ 、 $[B] = a^* - a^*_0$  (ただし、 $a^*_{\max}$  :  $a^*$  の最大値、 $a^*_0$  の初期値) と置き換えると、 $a^*$  については年代標準式が式 (12) で示される。

$$t = \ln\left(\frac{a^*_{\max} - a^*_0}{a^*_{\max} - a^*}\right) / k_a \quad (12)$$

ここで、 $k_a$  :  $a^*$  の速度定数、 $a^*$  :  $a^*$  値、 $a^*_{\max}$  :  $a^*$  の最大値、 $a^*_0$  :  $a^*$  の初期値

同様に、 $b^*$ については年代標準式が式 (13) で示される。

$$t = \ln \left( \frac{b_{\max}^* - b_0^*}{b_{\max}^* - b^*} \right) / k_b \quad (13)$$

ここで、 $k_b$  :  $b^*$ の速度定数、 $b^*$  :  $b^*$ 値、 $b_{\max}^*$  :  $b^*$ の最大値、 $b_0^*$  :  $b^*$ の初期値

「震源断層評価技術の整備」の執筆者

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

儘田 豊 主任技術研究調査官

松浦 旅人 技術研究調査官

藤田 雅俊 技術研究調査官

菅谷 勝則 技術研究調査官