

不確実性を考慮したイベント堆積物認定方法の提案と津波堆積物への適用

Event deposit identification method considering uncertainty and its application to tsunami deposits

吉井 匠¹⁾, 田中 姿郎²⁾, 松山 昌史³⁾, 伊藤 由紀⁴⁾, 濱田 崇臣⁴⁾

1. はじめに

平常時の自然現象に比して特異な規模の自然現象が生じた場合、地層中に平常時の堆積物とは異なる特性を持つ堆積物が残されることがあり（以下、イベント堆積物）、このようなイベント堆積物はその地点における自然災害履歴を紐解く上で重要な資料になる。特に、地層中には過去数千年間のイベント堆積物が保存されていることもあることから、歴史記録に基づく評価が難しい低頻度の自然災害について発生頻度や現象規模の評価への活用が期待されている。我が国においては、2011年に生じた東北地方太平洋沖地震においてイベント堆積物の一つである津波堆積物が注目されたことを受け、国内各地で精力的に津波堆積物調査がなされ、多くの地点で地質学的な自然災害履歴が参照できるようになってきた（例えば、東北大学・原子力規制庁）。これらの津波堆積物調査は学術的な貢献にとどまらず、自治体のハザードマップ作成や、重要施設の津波評価などの実務への活用も進んでいる。

一方、地質調査という側面から、イベント堆積物調査結果には大きな不確実性が存在する。イベント堆積物調査における不確実性の要因としては、イベント堆積物の分布に関する不確実性、イベント堆積物の観察・分析結果に関する不確実性、イベント堆積物の解釈

に関する不確実性、等が挙げられる。例えば、Goto et al. (2014) は東北地方太平洋沖地震津波により仙台平野で形成された津波堆積物の層厚を整理し、津波堆積物の層厚に大きなばらつきがあることを示している。さらに、イベント堆積物が地層中に保存されるまでの期間における変化（例えば、Szczuciński, 2012）や、地層中に保存されてからの生物擾乱など、堆積後の変化も不確実性に影響を及ぼす。また、イベント堆積物が発見された場合には観察や分析が行われるが、年代測定値に代表されるように、各種分析結果にはばらつきが有る。分析手法・装置に起因するばらつき以外にも、地質調査特有の問題として、試料の不均一性により分析箇所や対象の選定に起因する不確実性も存在する。イベント堆積物の分布や様々な分析結果からその起因事象や影響範囲・規模などが推測されるが、この推測に関しても不確実性がある。例えば、イベント堆積物の起因事象には津波も含めた複数の自然現象の可能性があるが、分析結果を基に津波起因と判断する不確実性（信頼度）、もしくは、津波以外の洪水や高波浪などではないと判断する不確実性（信頼度）である。イベント堆積物から影響範囲（津波の場合、浸水範囲）や規模（津波の場合、浸水深さや流速）、再来期間などが推測される場合には、これらの推測に関しても不確実性が存在する。

¹⁾ 一般財団法人電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部 気象・流体科学研究部門

²⁾ 一般財団法人電力中央研究所 企画グループ

³⁾ 一般財団法人電力中央研究所 原子力リスク研究センター

⁴⁾ 一般財団法人電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部 地質・地下環境研究部門

津波堆積物研究においては、津波堆積物の認定手順を確立する過程で不確実性が議論されてきた。例えば、原子力安全基盤機構(2014)はイベント堆積物の各種特徴に基づき各成因(自然現象)の確度評価を行うこと提案しているが、一方で、『津波堆積物調査を実施しても津波堆積物の可能性があるかどうかの曖昧さ(不確実さ)を完全に回避することはできない』としている。また、後藤ら(2017)は、既存の津波堆積物研究における認定方法を整理し、観察・分析項目や堆積物以外の情報との整合性を基にした認定手順を示しているが、詳細な検討が行なえない場合もあることから、津波堆積物の確度が小さい場合でも津波堆積物の可能性が否定されるわけではないとしている。このような不確実性があることから、津波堆積物評価では堆積物が認められない場合においても一定のリスクを見込むことが求められている(原子力安全基盤機構, 2014)。津波対策のみが目的であれば不確実性を見込んで保守的に評価することは一定の合理性があるが、不確実性が大きいということは、津波堆積物である確度が高い場合においても高潮などの他の自然現象起因である堆積物である可能性を完全に排除できないという事でもあり、認定された自然現象以外の潜在的な災害リスクを見逃す可能性もある。

イベント堆積物研究において不確実性が特に問題になるのは、発見されたイベント堆積物に基づく自然災害履歴を防災計画などに“いつ”反映するべきであるかということである。後藤ら(2012)は、津波堆積物が「候補」段階でも注意喚起としては有意義であるため社会に迅速に発信すべきであるとしているが、一方で、『あとで否定される可能性が残る「候補」段階の津波堆積物やアイデアを迅速に防災計画に取り入れてしまうと、収集がつかなくなるおそれがある』ことを指摘している。一般的に、イベント堆積物調査は地質・地形学などの専門家が実施し、防災計画は土木など工学系の専門家が実施している。そのため、両者が評価対象地域のイベント堆積物調査結果を正しく認識し、かつ認識を共有しておく

ことは極めて重要である。その点で、イベント堆積調査結果をどのように評価するか、その評価結果をどのように他の専門家に伝えるべきか、については検討の余地がある。

そこで本研究では、イベント堆積物調査において、調査結果に含まれる不確実性を考慮しつつ、複数のイベント起源である可能性を同時に評価できる認定方法について検討する。

2. 不確実性を考慮したイベント堆積物の認定方法

前述した既往の認定方法における課題を踏まえ、不確実性も考慮に入れつつ複数の自然現象に対してイベント堆積物を認定評価する手順を図1のように提案する。手順のイメージを表したものを図2に示す。

本提案手法では、最初にイベント堆積物を調査する地点の地形・地質等の特性に基づきイベント堆積物を形成しうる自然現象候補を全てリストアップし、それぞれの自然現象の特徴・規模を評価する(図1①)。続いて、

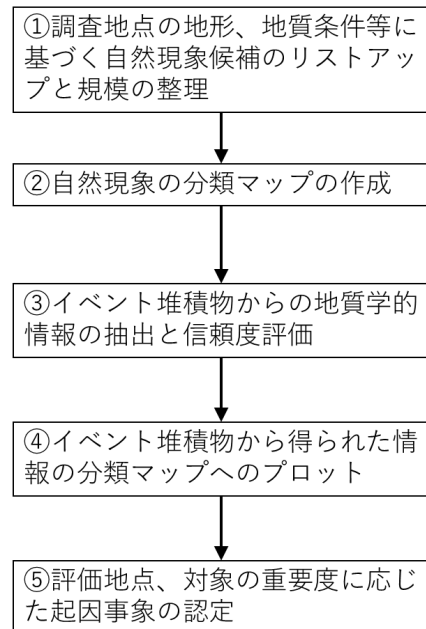


図1 本研究で提案するイベント堆積物の認定手順

自然現象の特徴・規模に基づき各自然現象を最もよく分離できる指標を作成し、自然現象の分類図を作成する(図2②)。この指標作成の際、自然現象を分離できるように各情報に重み付けを行う。なお、調査地点の地形・地質等の特性によりリストアップする自然現象の種類とその特徴・規模は異なるため、指標及び分類図は地点ごとに異なる。例えば、調査地点と河川との位置関係が異なれば、想定する洪水規模が変化するため作成される指標や分類マップも異なる(図2④)。また、平野での調査のように斜面崩壊の可能性をスクリーニングアウトできる場合、斜面崩壊は分類マップに現れないことになる(図2④上図)。

次に、イベント堆積物の調査結果から推測される起因事象の特徴に関する情報を評価する。ここで、前述した地質調査における信頼度(不確実性)は、推測される情報の確率分布として考慮する(図2③)。イベント堆積

物から得られた情報を②で得られた指標に適用することで、分類マップ上にイベント堆積物から推測される情報がプロットされる(図2④)。この際、推測される情報には指標作成時に求められた重み付けがなされる。また、推測される情報の信頼度(不確実性)は、分布マップ上においてプロットされる範囲で示される。つまり、得られた情報の信頼度が高いほどプロットされるイベント堆積物の範囲は狭まり、逆に情報の信頼度が低ければイベント堆積物の範囲は広がることになる。

イベント堆積物の起因事象は、自然現象の分布とイベント堆積物から得られる情報の分布の位置関係を基に認定する(図2④)。イベント堆積物から推測される情報によって、分類マップにおいてイベント堆積物の分布が特定の自然現象とのみ重複する場合もあれば、複数の自然現象と重複する場合もある。一方で、イベント堆積物から得られる情報が分布

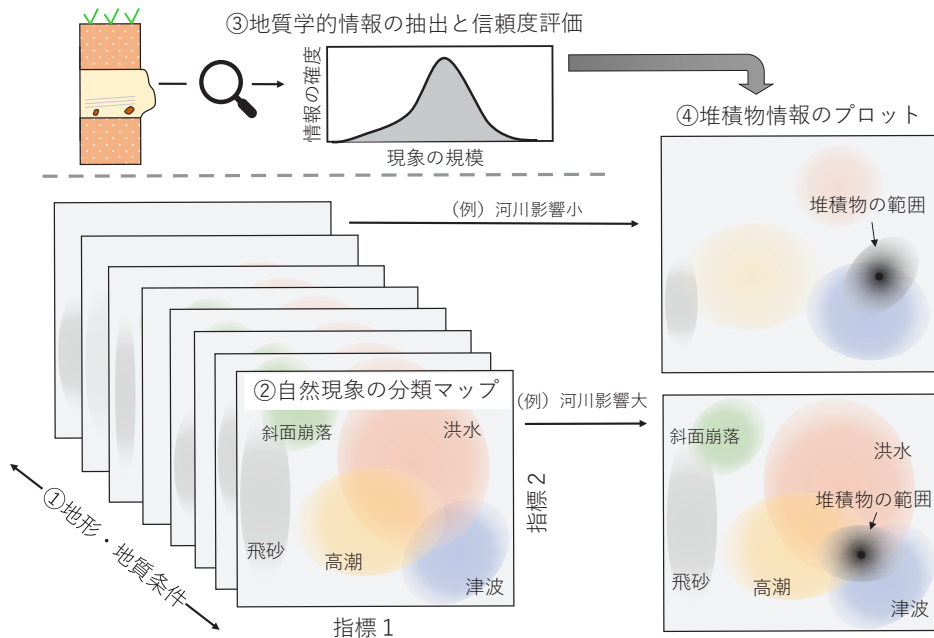


図2 イベント堆積物の認定のイメージ図

していない範囲は、イベントの起回事象ではないことが示唆されることになる。

以上のように、提案手法では複数の自然現象に対してイベント堆積物の起回事象である可能性が同時に、かつ同一手法で評価される。また、分類マップ上で評価結果および不確実性の幅が視覚的に示される。当提案手法の利点は、専門家以外でも評価結果の信頼度（不確実性）を理解できる点である。つまり、研究が十分進展し調査結果が信頼しうるものであれば不確実性の範囲は狭く、一方、調査結果に議論の余地が大きく残されているのであれば不確実性の範囲は大きく表現される。また、認定手順自体が研究の進展に関連していないため、イベント堆積物の研究や認識に進展があった場合でも、調査結果から推測される情報の信頼度（不確実性）を修正することにより随時評価結果を更新することができる。

3. 津波堆積物を想定したイベント堆積物認定方法の試行

本章では前章で概略を述べたイベント堆積物認定方法を試行し、手法の有効性を確認する。防災上の重要度や研究例の豊富さなどを考慮し、対象として陸上に残存する津波堆積物を想定する。ただし、本提案手法は既存の認定手法とは大きく異なっており、現時点で未解明な情報も多く存在する。そのため、不明な情報については仮想的に与え、あくまで

提案するイベント堆積物認定方法の手順や、評価における利点・課題などを把握することを目的とする。

3. 1 地形・地質条件に基づく自然現象の整理

本手法を適用するためには、イベント堆積物を形成しうる全ての自然現象をリストアップし、その特徴を整理する必要がある（図 1 ①）。ここで重要なのは、イベント堆積物が生じたという報告の有無によらず、考えられる限りの現象をリストアップすることである。本研究では外力の違いなどにもとづき、イベント堆積物を形成しうる自然現象を表 1 のように整理した。

イベント堆積物形成に必要となる土砂移動が静的な外力によるものか、平常時には生じない動的な外力によるものかにより、現象を 2 種類に大別して考えた。静的な外力による底質移動としては、底質が受ける重力（自重）による土砂移動である斜面崩壊・地すべりを想定した。降雨・地震などが斜面崩壊・地すべりのきっかけになることが多いが、移動を開始した土砂自体は重力（自重）に従うと考えられたことから静的な外力に分類した。一方、動的な外力による底質移動は、外力を媒介する物質の違いから、水流によるものと、気流（風）によるものに分類した。水流としては、河川流の一形態である洪水・土石流、引力に起因する潮汐（天文潮）、気象現象により生じる

表 1 イベント堆積物を形成しうる自然現象の整理結果。
特徴は最大規模の現象に対するものである

外力	媒介物質	起因力	現象	地形・地質条件	流動			土砂移動					
					主流方向	作用回数 (回)	作用時間 (分)	供給源	移動方向	移動速度 (m/s)	移動距離 (m)	移動高さ (m)	移動形態
静的	なし	重力	斜面崩壊	○	低地方向	～数回	～1時間	崖、斜面	一方向	～数十m/s	～数百	～数十	滑動、転動、跳躍
		重力	地すべり	○	低地方向	～数回	～数年	崖、斜面	一方向	～数cm/day	～数千	～数十	滑動、転動
淡水	降雨、重力	洪水	洪水	○	低地方向	～数回	～数日	上流域	一方向	～数十m/s	～数万	～数十	滑動、転動、跳躍、浮遊
		降雨、重力	土石流	○	低地方向	～数回	～1日	上流域	一方向	～数十m/s	～数万	～数十	滑動、転動、跳躍
		引力	潮汐	○	陸・沖双方向	～数百回	～数年	沿岸	一方向	～数cm	～数千	～数十	滑動、転動、跳躍、浮遊
海水	風	高潮	高潮	○	陸・沖双方向	～数回	～数時間	沖合～陸上	双方向	～数十m/s	～数千	～数m	滑動、転動、跳躍、浮遊
		風	高波浪	○	陸・沖方向	～数千回	～1日	沿岸～陸上	乱れ、双方向	～数m/s	～1km	～数m	滑動、転動、跳躍、浮遊
		動的	地殻変動	津波	○	陸・沖双方向	～数十回	～1時間 (1波)	沖合～陸上	往復流	～数十m/s	～数千	～数十
大気	風	地震	地震	○	低地方向	～数回	～数十分	下部地層 (砂層)	一方向	～数cm	～数m	滑動、転動、跳躍	
		風	台風	○	陸	～数時間	陸上	陸上	限定できない	～数十m/s	～数百万	～数十万	滑動、転動、跳躍、浮遊
		風	竜巻	○	陸	～数十分	陸上	陸上	限定できない	～数十m/s	～数百万	～数十万	滑動、転動、跳躍、浮遊
対応する地質学的調査 (表2)					(C)	(B)	(F)	(D)	(C),(D)	(A)	(D)	(E)	(E)

高潮（気象潮）・高波浪，および地殻変動・地すべり・空振などの気象現象・隕石などに起因する津波を想定した。地震動によるものとして地層の液化化による噴砂を，大気現象に起因するものとして台風（ハリケーン）や竜巻による飛砂を想定した。

次に，各自然現象によりイベント堆積物調査地点で生じる流動や土砂移動の特性を整理する。イベント堆積物調査に求められているのは既往最大クラスの自然災害の評価であることを踏まえ，本研究では自然現象の最大規模を表1に示すように仮想的に与えた。ただし，具体的な値の想定は不可能であることから，ここでは最大規模を包括できるようにオーダー単位で与えた。

3.2 自然現象の分類マップの作成

分類マップの作成には主成分分析を用いた。表1に示した現象の規模は自然現象によりオーダー単位で異なるため，ここではオーダー（単位の桁数）について，最小のオーダーを-1，最大のオーダーを1とするように規格化をおこなった上で主成分分析を行った。抽象的な情報についても-1～1に規格化した数値を与えた。抽象的な情報が3種類

以上に分類される場合は以下の値を与えた。

媒介物質 なし：0，淡水：1，海水：-1，
大気：0

主流方向 低地方向：0，双方向：1，限定できない：-1

供給源 上方：0.5，沿岸：-1，沖合～陸上：0，下部地層：0，陸上：1

移動方向 一方向：0，双方向：1，限定できない：-1

主成分分析における第一主成分，第二主成分の負荷量，および作成された分類マップ（主成分得点）を図3に示す。寄与率は第一主成分で39.5%，第二主成分で30.8%であり，両者を併せて70.3%であった。第一主成分は主に地形条件や浮遊砂の有無を強く反映しており，第二主成分は主流方向，移動方向，移動高さを強く反映する結果となった。分類マップ（図3）においては，台風と竜巻が重複する箇所にプロットされるものの，それ以外の自然現象は明確に分離された。津波を含む海起源の自然現象は第一主成分で他の自然現象と分離されており，第一主成分で用いられる情報が海起源の自然現象とそれ以外の自然現象を区別する上で重要であることが分か

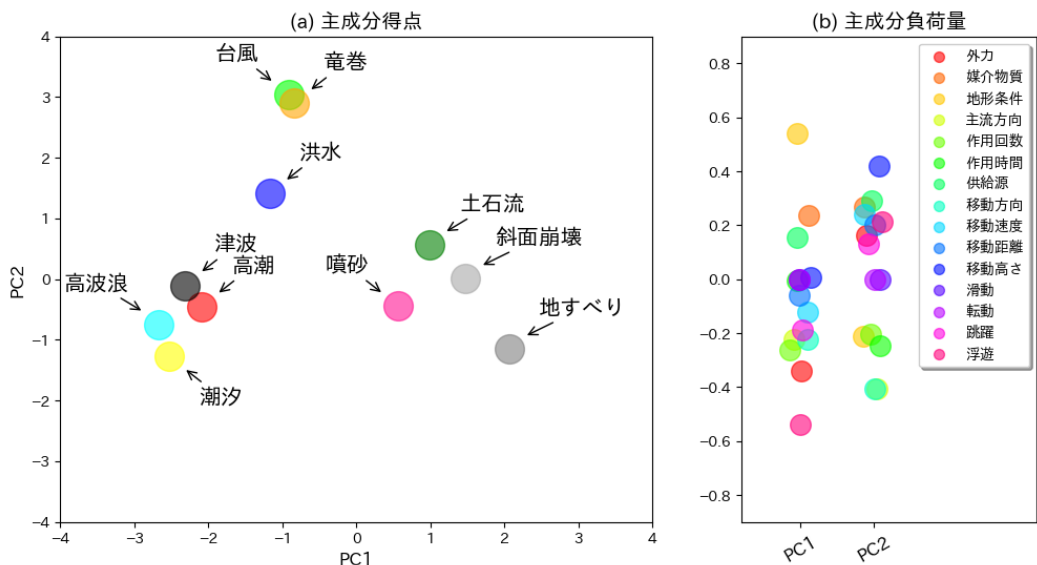


図3 全要素を用いた自然現象の分類マップ（左）と負荷量（右）

る。

一方、イベント堆積物からは表 1 に示した全ての項目の情報が得られるわけではない。特に、外力、媒介物質は堆積物から推定することは困難である。また、地形情報は調査地点を選定する際に堆積物調査とは別に検討可能である。そこで、これらの項目を除き、地質情報から得られると期待される情報のみを用いて主成分分析を行った結果が図 4 である。第一主成分の寄与率が 42.1%、第二主成分の寄与率が 29.1% となり、両成分の合計は 71.2% であった。第一主成分は主流方向・移動方向、供給源、作用回数、移動高さ等を強く反映しており、流れに関する情報と解釈された。第二主成分は浮遊砂の有無、移動速度、跳躍等を強く反映しており、砂の移動形態に関する情報と解釈された。分類マップ上では、斜面崩壊と土石流、台風と竜巻がほぼ同じ場所にプロットされたものの、その他の自然現象については明確に分離された。

既往の災害履歴においては、必ずしも表 1 で整理した最大規模の自然現象が生じるわけではなく、自然現象の規模にもばらつきがあると考えられる。そこで、自然現象の規模の範囲を想定し、分類マップにおけるばらつき

の範囲を検討した (図 5)。なお、流速や水深などには一定の相関があると考えられるが、イベント堆積物を用いた自然災害履歴の評価が既存の知見を上回る規模の自然現象の有無を対象としていることも踏まえ、ここでは自然現象の各項目は独立変数として取り扱った。自然現象にばらつきを与えた結果 (図 5)、斜面崩壊と土石流、台風と竜巻がほぼ重複した範囲にプロットされることを除き、その他の自然現象は重複することなく分離された。

3.3 地質学的情報の整理と不確実性の設定

分類マップ上にイベント堆積物の情報をプロットするためには、イベント堆積物調査から表 1 の項目に対してどのような情報が得られるのかを整理する必要がある。本研究では既存の研究事例 (例えば, Fritz and Moore, 1999; 七山・重野, 2004; 堆積学研究会, 2011; 藤原, 2015) を参考にし、イベント堆積物の観察結果から推測される情報とそのために必要となる観察項目を表 2 に示すように整理した。なお、表 2 はあくまで一例であり、各観察・分析項目に関する解釈は専門家間で相違があり、研究の進展により解釈が変わる可能

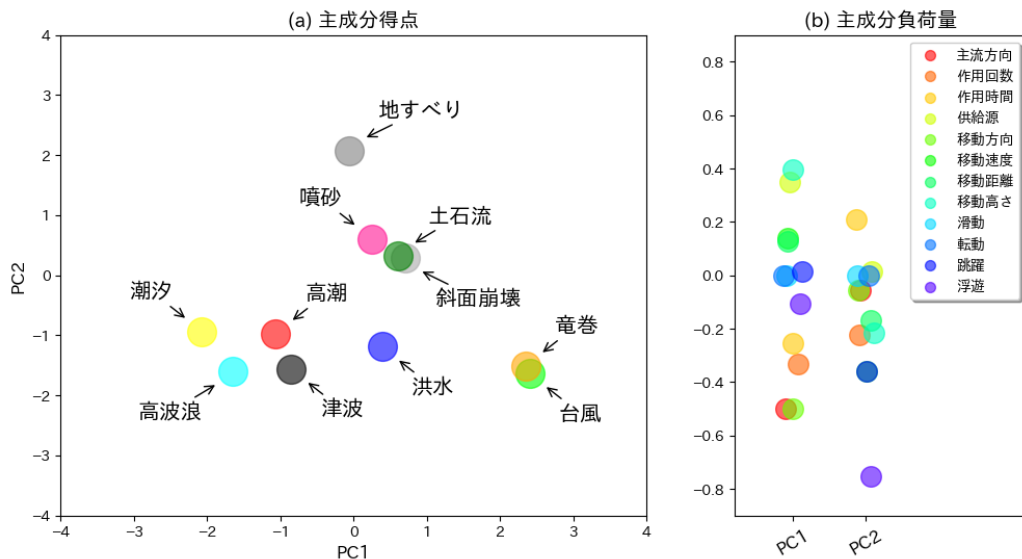


図 4 地質調査から求められる要素を用いた自然現象の分類マップ (左) と負荷量 (右)

性もある。解釈に関する議論は本研究の範囲外であるため、ここでは詳述しない。

イベント堆積物から得られる情報は、イベント堆積物が津波堆積物に典型的な特徴を有していると仮定し、表2で示した各種分析の結果、表3に示す解釈がなされた津波堆積物を仮定した。解釈された情報の不確実性については、確率論的津波評価手法（土木学会，2016）を参考に、推測された情報に関して確率分布を与えることで考慮する。確率論的津波評価手法においては、認識論的不確実性をロジックツリーの分岐で表し、分岐の重みとして離散的に表現しているが、本研究では連続的な確率分布として取り扱った。津波堆積物においては、表2に示す特徴の有無が多くの調査結果で報告されており、偶然的な不確実性（イベント堆積物がそもそも有するばらつき）については一定の情報が得られている。しかし、地質学的調査では、観察結果から表3に示した解釈をする際の認識論的不確実性（知識・情報不足に起因するばらつき）が大きいと考えられ、現時点でその定量的な

評価は不可能である。そのため、本研究では各解釈について図6に示す形で仮想的に確率分布を与えた。ここで、底面流速、作用回数、作用時間、移動距離、移動高さは、堆積物から得られる情報が現象の下限値である可能性を考え、上方に分布する確率分布とした。特に流速については、推測される流速以上は一様分布として取り扱った。その他の情報については堆積物から得られる情報を極大値とする分布形とした。また、これらの確率分布の与え方が評価結果に及ぼす影響を把握するために、基本ケースの他に、作用回数、供給源、底質の移動速度の確率分布を変化させ、不確実性が小さい場合、および不確実性が大きい場合を想定した（図6）。

3.4 分類マップ及び地質学的情報を用いた起因事象の認定

前節で想定した情報の確率分布（図6）を満たすように100,000回乱数を発生させ、それぞれの乱数から各指標を算出し、分類マップにプロットした（図7）。また、プロット

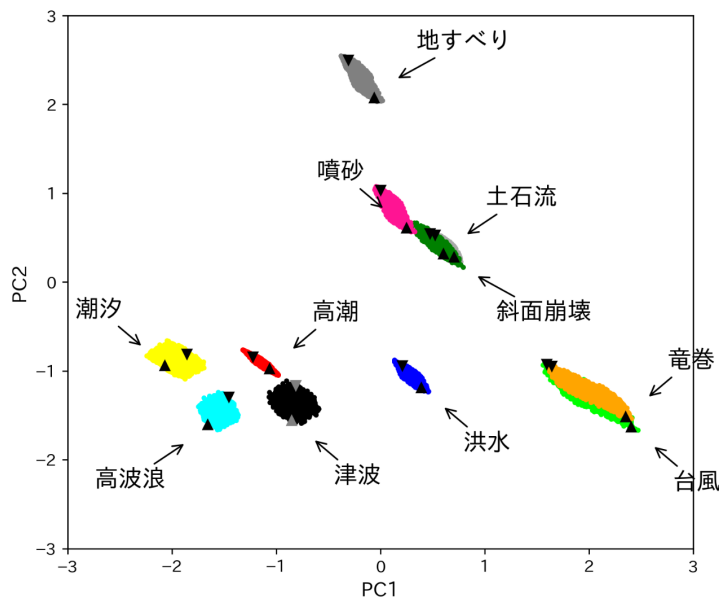


図5 ばらつきを考慮した自然現象の分類マップ
（▲：自然現象の最大規模，▼：自然現象の最小規模）

表 2 堆積物の観察項目と推測される自然現象の特徴

情報の区分	観察項目	観察結果	推測される現象
(A) 底面流速を推定する要素	偽礫	あり	高流速の作用・高濃度の発生
		なし	
	底部境界面	侵食面	高流速の作用
		平滑	
	逆級化構造	あり	高速流の発生
		なし	
	粒度分布	粗粒・礫を含む	高流速の作用
		細粒のみ	
	葉理	あり	流れの存在
		なし	流れなし
			層流状態での移動
	ベッドフォーム	アンティデューン	高フルード数の発生
		平滑床	流れの高領域、低流領域
		カレントリップル	流れの作用
		バルハン	流れの継続、水の作用
		多角形リップル	多方向の複雑な流れ
		なし	
Bundle の層厚変化	潮位周期と一致	潮汐作用の卓越	
	一致しない		
(B) 外力の作用回数を推定する要素	ユニット構造	あり	複数回の流体作用
		なし	単体の流体作用
	Bundle(斜交層理)の厚さ	側方変化を示す	流体運動強度の変化
		示さない	
	粘土層	含む	流速低下状態の発生
	含まない		
(C) 流れ方向を推定する要素	堆積厚分布	陸方薄層化	沖・沿岸からの土砂の供給 陸方へのエネルギーの減少
		海方薄層化	陸上からの土砂供給
		変化なし	
	粒度分布(面的)	陸方細粒化	沖・沿岸からの土砂の供給 陸方へのエネルギーの減少

		海方細粒化	陸上からの土砂供給
		変化なし	
密度分布		密度変化を示す	軽密度方向への底質移動
		変化なし	
ベッドフォーム		カレントリップル・アンティデューン	一方向流の発生
		多角リップル	多方向の流れ
		ベッドフォームなし	
粒子配列		単方向(陸方向)	海から陸方向への流れ
		単方向(海方向)	陸から海方向への流れ
		双方向(海、陸方向)	双方向への流れの発生
		なし	
斜交葉理		ハンモック状斜交層理	振動流
		陸方向に降下	陸方向への流れ
		海方向に降下	海方向への流れ
再活動面		再活動面を示す	双方向への流れの発生
		示さない	
(D) 供給源を推定する要素	珪藻	海棲種の有意な増加	陸方向への土砂移動
		優位な変化なし	
	有孔虫	有意な増加	陸方向への土砂移動
		有意な増加なし	
	海棲生物遺骸	有意な増加	陸方向への土砂移動
		有意な増加なし	
	貝形虫	海棲貝形虫を含む	陸方向への土砂移動
		含まない	
	有機物	海起源有機物の有意な増加	陸方向への土砂移動
		増加なし	
	粒子形状	円摩度が高い	海からの土砂供給
		円摩度が小さい	陸上からの土砂供給
	粒度分布	淘汰が良い	海からの土砂供給
		淘汰が悪い	陸上からの土砂供給
	鉱物組成	海岸・海底砂と類似	海からの土砂供給
		類似しない	

	DNA	海棲生物起源の DNA を含む	海からの土砂供給
		含まない	
	バイオマーカー	海棲種のバイオマーカーがある	海からの土砂供給
		海棲種のバイオマーカーがない	
	化学組成	海水に特徴的な成分を含む	海からの土砂供給
		特徴的な成分がない	
(E) 土砂の移動形態を推定する要素	級化構造	級化構造を示す	浮遊砂の発生
		級化構造を示さない	
	底部構造	逆級化構造	掃流砂の発生 トラクションカーペット
		無構造	掃流砂の発生
		級化構造	浮遊砂の卓越
(F) 堆積速度を推定する要素	荷重痕(火災構造、脱水構造など)	荷重痕がある	急速な堆積
		ない	
	逆級化構造	逆級化構造が厚い	比較的長い堆積時間
		逆級化構造が薄い	短い堆積時間
	粘土層	粘土層を含む	滞留時間が長い
		含まない	滞留時間が短い
	低密度物質(木、植 物片)	表層に濃集している	穏やかな堆積
	濃集していない		
年代測定 (C14, OSL 等)	イベント層上下の年代差が小さい	短期間でのイベント発生	
	年代差が大きい		

表3 想定した津波堆積物の特徴とその解釈

項目	堆積物の特徴	解釈
(A)底面流速を規定する要素	・堆積物底部の侵食面 ・偽礫の存在	最大流速 3m/s 以上
(B)外力の作用回数	・2つのサブユニット	作用回数 2 回以上
(C)流れ方向	・陸方薄層化	主流方向・移動方向は陸上方向・海方向の2方向
(D)土砂供給源	・内陸 100m 地点の堆積物中に海棲珪藻の検出	・沿岸からの土砂供給 ・移動距離は 100m 以上
(E)土砂移動形態	・級化構造の発達	・浮遊砂の卓越 ・底質の移動高さ 10m 以上
(F)堆積速度	・サブユニット間にマッドドレープを挟む	・作用時間 10 分以上

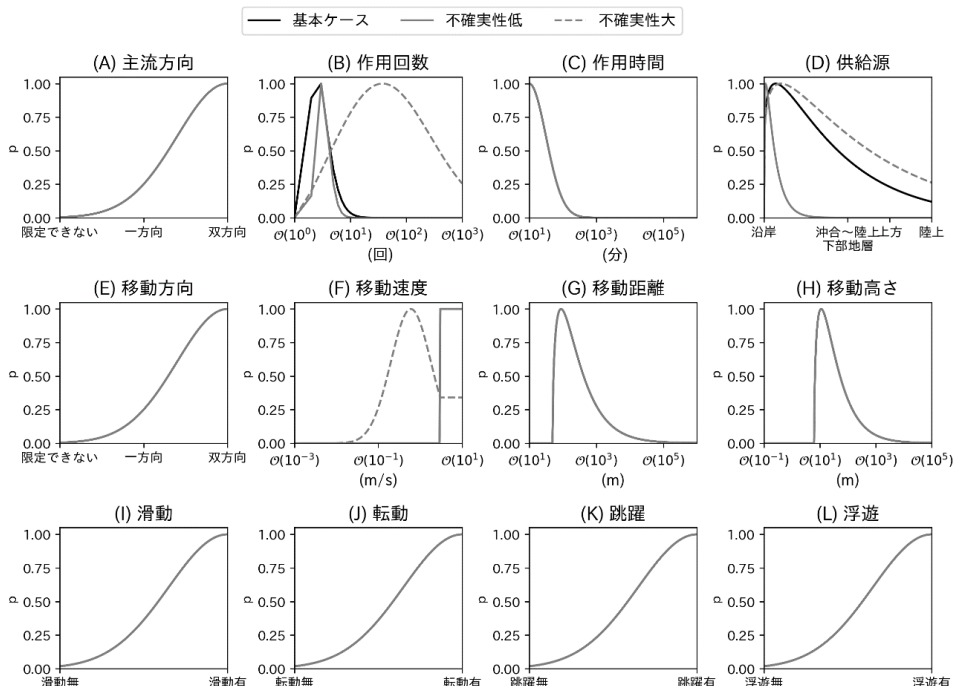


図6 津波堆積物から得られたと仮定した情報の確率分布

された点から確率密度を算出した。その結果、基本ケースの情報は主に津波、高潮、洪水の中央付近に分布した(図 7(a))。このことから、地質情報の不確実性が仮想したとおりであれば、イベント堆積物の起回事象として 3 種類の自然現象(津波、洪水、高潮)の分類が難しいことが示唆される。自然現象の分布範囲に比べて堆積物の情報の分布範囲は大きく、堆積物の情報は高潮、土石流、斜面崩落の分布範囲まで至っており、これらが起回事象である可能性も排除できないことが示唆される。一方、高波浪や潮汐、台風、地すべり等とは分布範囲が明らかに異なっており、これらの自然現象由来のイベント堆積物ではないことが示される。

イベント堆積物から推測される現象の作用回数や供給源に関する情報の不確実性が小さい場合、堆積物の分布の中央はほとんど変化しないものの、第一主成分方向の分布範囲がやや狭まり、洪水の範囲からやや遠ざかる結果となった(図 7(b))。これにより、堆積物の起回事象として津波・高潮の可能性が相対的に高まる結果となった。一方、堆積物から得られる情報の不確実性が大きい場合では、堆積物の分布範囲が拡大し、津波、洪水、高潮に加え、高波浪もその分布範囲に含まれた(図 7(c))。この場合、起回事象として最も可能性が高いのは津波、高潮であるが、洪水、高波浪である可能性も十分考えられ、填砂、土石流、斜面崩壊の可能性も排除できないことが示唆される。

4. 考察

不確実性を考慮できるイベント認定手法を提案し、仮想的な津波堆積物に対して認定手法を適用した。本研究で提案した認定手法の最大の利点は、イベント堆積物から得られている情報を統合し、自然現象との関係を客観的に把握できることにある(図 7)。現世の堆積物との類似性に基づく認定方法では、複数の自然現象である可能性を同時に評価するのが難しかったが、本手法ではそれぞれの自

然現象である可能性を同時に把握できる。加えて、イベント堆積物調査が十分に実施されていない場合や、堆積物に明確な特徴が確認できない場合においても、現時点の調査結果から推測される起回事象候補とその不確実性の程度を把握することが可能である。視覚的な情報の整理は、実務評価に携わる非専門家と研究の現状認識を共有する上でも有用であると考えられる。

不確実性の程度を客観的に評価できることは、最適な調査計画の立案にも役立つ。評価における情報の重みはイベント堆積物調査とは関係なく決定されるため、調査の進展とは無関係である。そのため、現状の評価の不確実性を把握した上で、評価指標において重視される項目を踏まえながら、今後必要な調査量や調査項目などを調整することが可能となる。例えば、洪水との区別が評価上問題であるのであれば、表 2 における (C) 流れ方向を推定する要素、(D) 供給源を推定する要素について重点的に調査・分析すればよいことになる。

しかしながら、本認定手法は、認定に必要な全ての情報が得られておらず、実務へ適用するには課題が多く残されている。堆積物を用いて評価できる年代は地質学的スケール見ると短いため、現世における地形・地質条件からある程度古環境を推測できる。そのため、表 1 に示す自然現象のリストアップに活用できる情報は存在する。例えば、平野における調査では、斜面崩壊や地すべりによるイベント層形成の可能性は極めて低く、一方で河川が存在しない地点においては洪水などによるイベント層形成の可能性は低いことが事前に把握可能である。斜面崩壊、地すべりについては現在の地形を基に各自治体が危険箇所情報を公開しており(例えば、国土交通省)、液状化についても歴史記録がまとめられている(例えば、若松, 2011)。各調査地点の自然現象の規模評価には、このような情報を活用することができると考えられる。

本手法を実務に活用する上で最大の課題は、イベント堆積物から推測される情報の幅

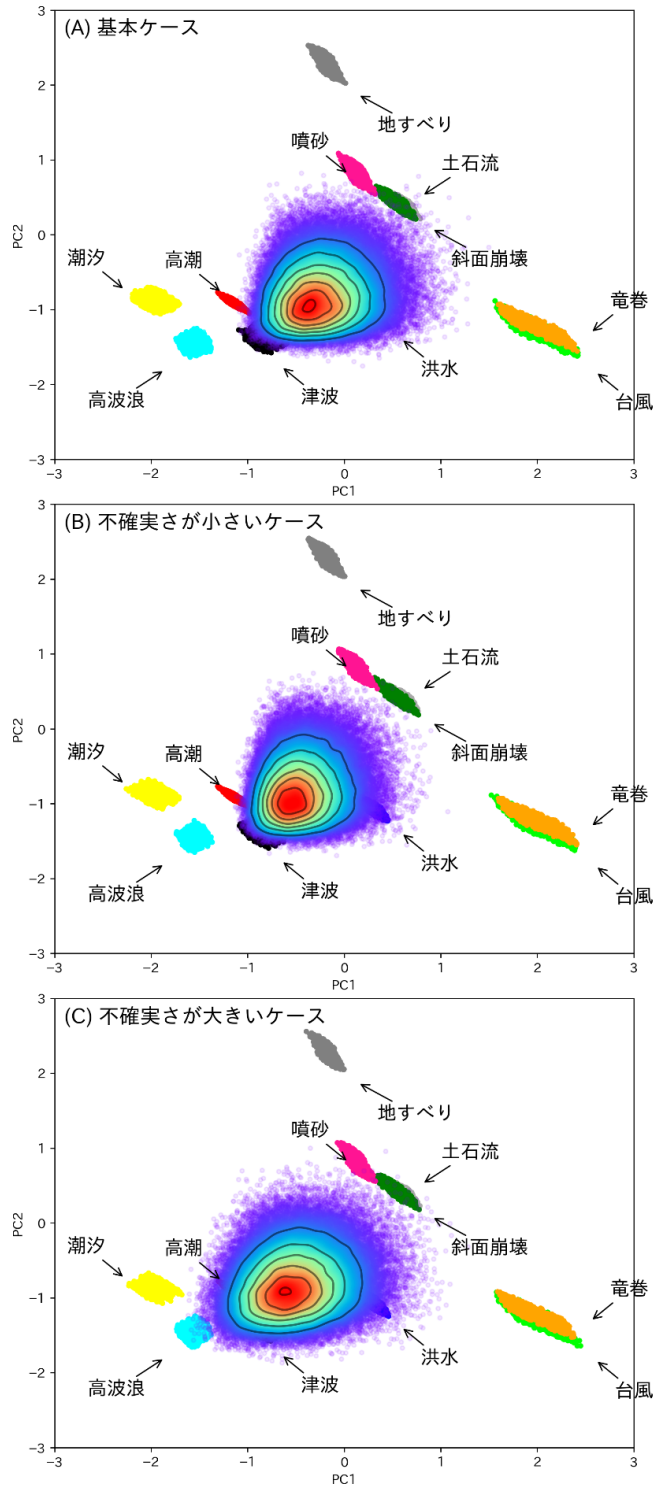


図7 想定した津波堆積物の情報の分布範囲。堆積物の情報は赤色ほど確率が高く、青色～紫色になるほど確率が小さいことを意味する。

と確度 (図 6) の評価である。イベント堆積物から推測した情報の信頼度 (不確実性) を評価するには、堆積物を解釈する際に生じる認識論的不確実性と堆積物自体が有する偶発的不確実性の両者を切り分けて評価する必要がある。前者は堆積物の形成過程を完全に理解できていないことに起因する不確実性であり、後者は堆積物におけるばらつきなど、偶発的要素に依存する不確実性である。偶発的要素については堆積物の事例報告数が蓄積されれば評価が可能になり、前述した Goto et al. (2014) のように堆積物に関して多量のデータを整理した研究や、堆積物のデータベース構築 (例えば、Peters and Jaffe, 2010) など、着実に不確実性評価に活用できる知見が蓄積されている。一方、認識論的不確実性については、実験などにより再現されている堆積学的特徴については専門家の中でも一定の共通認識があるように思えるが、観測事例として“経験的に”もしくは“直感的に”理解されているものについては、専門家間の認識論的不確実性が極めて大きいものと思われる。また、表 2 で示す観察項目はそれぞれ情報の信頼度が異なると考えられるが、多様な専門分野にまたがっているため信頼度に関する認識の違いも大きいものと推察される。専門家が有する認識を確率分布に反映するには、例えば、原子力発電所における確率論的ハザード評価で活用されている専門家へのアンケート (例えば、土木学会, 2008) や、SSHAC (Senior Seismic Hazard Analysis Committee) ガイドライン (U.S.NRC, 2012) のように、認識論的不確実性を評価するための枠組みが必要になる。また、認識論的不確実性の幅を狭めるには、現地観測に加え、水理実験・室内実験・数値解析などを活用し、津波による物質移動、堆積物形成過程、および堆積物の特徴と水理量の関係を検討していく必要もある。

最後に、本研究で提案した認定手法は特定地点におけるイベント堆積物の調査のみを想定したが、現状の認定においては、歴史記録との対比やイベント層の広域分布などの情報も認定根拠として用いられている。このよう

な情報を本手法に組み込むためには、年代測定結果におけるばらつきに加え、広域対比のイベント堆積物が同時に発生したと考える不確実性の評価が必要であり、手法としての改善の余地も多く残されている。

5. まとめ

本研究では不確実性を反映できるイベント認定手法を提案し、津波堆積物を想定して認定手法の有効性を確認した。本手法は評価結果が視覚的に把握でき、非専門家に対して専門家の現状認識がどのように変化しているのかを容易に提示できるところに利点がある。イベント堆積物の起因事象をどう認定するかは解釈の仕方の問題であり、実務において最も重要なのは、評価結果について専門家と一般社会も含めた非専門家で共通した認識を持ち、適切な時期に評価結果を防災計画等に反映していくことである。その点で、正しい手法は一つではなく、多数あって当然と考えられる。イベント堆積物調査の社会的重要性が増していることを踏まえると、学術的な側面だけでなく、評価結果の社会への発信方法についても継続的に議論していく必要がある。

謝辞

本稿は 2019 年度津波堆積物研究会 (東京大学地震研究所)、および 2021 年の日本地球惑星科学連合大会で発表したものについて修正・加筆したものである。発表において本研究に対して様々な観点から有用な意見を頂いた。意見を頂いた関係者に感謝を表す。

参考文献

- (1) 原子力安全基盤機構 (2014) 津波堆積物調査・評価に関する手引き, JNES-RE-2013-2022.
- (2) 後藤和久, 西村裕一, 宍倉正展 (2012) 地質記録を津波防災に活かす - 津波堆積物研究の現状と課題, 科学, 82

- (2), 0215-0219.
- (3) 後藤和久, 菅原大助, 西村祐一, 藤野滋弘, 小松原純子, 澤井裕紀, 高清水康博 (2017) 津波堆積物の認定手順, 津波工学研究報告第 33 号, 45-54.
- (4) 堆積学研究会 (2011) 堆積学辞典 普及版, 朝倉書店, 470p.
- (5) 東北大学災害科学国際研究所, 原子力規制庁長官官房技術基盤グループ, 津波痕跡データベース, [http:// tsunami-db.irides.tohoku.ac.jp](http://tsunami-db.irides.tohoku.ac.jp) (2023/4/24 アクセス)
- (6) 土木学会 原子力土木委員会 津波評価部会 (2008) ロジックツリーの重みのアンケート結果 (平成 20 年度), <https://committees.jsce.or.jp/ceofnp/node/39>.
- (7) 土木学会 原子力土木委員会 津波評価小委員会 (2016) 原子力発電所の津波評価技術 2016.
- (8) 七山 太, 重野聖之 (2004) 遡上津波堆積物概論 - 沿岸低地の津波堆積物に関する研究レビューから得られた堆積学的認定基準. 地質学論集, (58), 19-33.
- (9) 藤原治 (2015) 津波堆積物の科学, 東京大学出版会, 283p.
- (10) 国土交通省水管理・国土保全局砂防部, 各都道府県が公開している土砂災害危険箇所と土砂災害警戒区域, 国土交通省ホームページ, http://www.mlit.go.jp/river/sabo/link_dosya_kiken.html, (参照 2019-01-07) .
- (11) 若松加寿江 (2011) 日本の液状化履歴マップ 745-2008. 東京大学出版会 .
- (12) Fritz , W. J., Moore , J. N. (1999) . 層序学と堆積学の基礎 (原田憲一訳) . 愛智出版 , 386p.
- (13) Goto, K., Hashimoto, K., Sugawara, D., Yanagisawa, H., Abe, T. (2014) . Spatial thickness variability of the 2011 Tohoku-oki tsunami deposits along the coastline of Sendai Bay. *Marine Geology*, 358, 38-48.
- (14) Peters, R. and Jaffe, B. (2010) . Database of Recent Tsunami Deposits, U.S. Geological Survey Open-File Report 2010-1172.
- (15) Szczuciński, W. (2012) . The post-depositional changes of the onshore 2004 tsunami deposits on the Andaman Sea coast of Thailand. *Natural Hazards*, vol. 60, no. 1, p. 115-133.
- (16) U.S.NRC. (2012) . Practical Implementation Guidelines for SSHAC Level 3 and 4 Hazard Studies, NUREG-2117.