

氏名	ささき はな 佐々木 華		
学位の種類	博士（理学）		
報告番号	甲第 1752 号		
学位授与の日付	平成 31 年 3 月 14 日		
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当（課程博士）		
学位論文題目	Study on paleo-flood and slope failure events recorded as lacustrine sediment gravity flow deposits （湖成重力流堆積物として記録された古洪水・古地震イベントに関する研究）		
論文審査委員	（主 査） 福岡大学	教授	上野 勝美
	（副 査） 福岡大学	教授	杉山 哲男
	福岡大学	教授	奥野 充

内 容 の 要 旨

Lacustrine deposits record flood and earthquake events as intercalated sediment gravity flow deposits. Magnitudes of erosion by flow events and high-resolution event intervals can be determined from lacustrine deposits composed of varves formed by annual layers. Sediment gravity flow deposits intercalated in lacustrine sequences are caused by river flood inflow or lake slope failure triggered by earthquakes. Sediment gravity flows deposit characteristic formations such as hyperpycnites and turbidites when the flows lose grain support mechanisms in their fluid. Statistical frequency distributions, such as lognormal, power-law, and exponential, have been proposed for modeling sediment gravity flow deposits in terms of event magnitude. Bed-thickness frequency distributions of such deposits reflect their origins and materials in addition to the event magnitudes. Furthermore, stratigraphic changes in bed-thickness and event frequency have been analyzed to evaluate event recurrence intervals. Sediment core samples are frequently used for determining high-resolution event magnitudes and recurrence intervals from lacustrine deposits. However, there are certain limitations associated with the use of core samples, especially in determining the origin of events. Moreover, it is difficult to identify the factors that control the bed thickness of sediment gravity flow deposits through analyses of core samples. Therefore, many studies have used paleo-earthquake records in addition to event correlation to evaluate event magnitudes and recurrence intervals. Identification and classification of

sediment gravity flow deposits are important, and standard sedimentary facies are necessary to solve the above-mentioned challenges. The aims of this study are: (1) to establish typical sedimentary facies based on estimated sedimentary processes of flood, slope failure, and flood-induced slope failure deposits with considering their lateral changes, (2) to statistically characterize sediment gravity flow deposits with considering relationships between deposit types and origins, and (3) to determine paleoclimates and lake environments from stratigraphic variations in the studied formations. The Middle Pleistocene Hiruzenbara and Miyajima formations, including various types of sediment gravity flow deposits, were investigated in this study.

The Middle Pleistocene Hiruzenbara Formation, distributed in Maniwa City, Okayama Prefecture, is composed of dammed lake deposits of the paleo-Hiruzenbara Lake. The study sites have several diatomite mining pits and, therefore, sediment gravity flow deposits in pits located several hundred meters to few kilometers apart can be correlated. Flood inflow and slope failure deposits in the Hiruzenbara Formation can be easily identified because background diatomaceous-deposit of background consists of diatom fossil shells more than 95%. In this study, the thickness and frequency of flood and slope failure deposits along the slope and in the central section of the paleo-lake were measured. The Miyajima Formation is distributed in Nasushiobara City, Tochigi Prefecture. This formation is composed of middle Pleistocene lacustrine deposits of the paleo-Miyajima Caldera Lake and includes several flood deposits and flood-induced slope failure deposits. Continuous outcrops of this formation occur along the Houki River. In this study, flood, slope failure, and flood-induced slope failure deposits were examined, and their thicknesses and frequencies were measured.

Columnar sections, continuous photographs, LL-channel samples, peel samples, and block samples of the study sites were obtained. These samples were used for detailed analyses of the sedimentary facies of sediment gravity flow deposits. In addition to these examinations, thin section and grain size analyses of the samples were carried out. The continuous photographs, LL-channel samples, and peel samples were used for stratigraphic analysis of the sediment gravity flow deposits. Thicknesses of sediment gravity flow deposits and frequencies by the number of annual layers were examined using bed-thickness frequency distributions, rank-frequency plots, and Poisson plots. Stratigraphic changes in the thicknesses and frequencies of sediment gravity flow deposits were also examined.

Erosional and non-erosional flood deposits are observed in both formations studied. Erosional flood deposits consist of inflow materials and have thicknesses of 2-5 cm. These deposits can be divided into two units those are separated by an erosional surface. The upper unit has weak inner erosional surfaces. Detailed observations

revealed that this type of deposit becomes thinner laterally toward the distal direction, and the lower unit pinches out toward the distal area. Non-erosional deposits consist of inflow materials and have thicknesses smaller than 1 mm. These deposits exhibit only slight variations of sedimentary facies and are continuously distributed in the lateral direction, with only a few exceptions of relatively thinner beds.

Slope failure deposits consist of rip-up clasts of background varved deposits and have thicknesses of 1-5 cm. These deposits show lateral variations from those containing large rip-up clasts to massive structureless beds. The sedimentary facies and thickness of slope failure deposits change significantly in the lateral direction. Flood-induced slope failure deposits consist of rip-up clasts of underlying deposits and inflow deposits and have thicknesses of 1-100 cm. Similar to the case of slope failure deposits, the lower layer of flood-induced slope failure deposits may be eroded. However, erosion magnitudes are relatively weak when the base is composed of structureless deposits. Significant lateral variations are observed in these deposits as well.

In the Hiruzenbara Formation, flood deposits consisting of on 193 layers in the East pit, 371 layers in the South pit, and 40 layers in the West Pit were measured. Moreover, slope failure deposits comprising 36 layers in the East pit, 103 layers in the South pit, and 86 layers in the West Pit were investigated. In the Miyajima Formation, flood-induced slope failure deposits consisting of 636 layers were studied. Bed-thickness frequency distributions of the flood deposits correspond to power-law-like distributions. The rank-frequency plot for the slope section (East pit) is a straight line, whereas those for the central section of the lake (South and West pits) have a slight bend at 6 mm. The bed-thickness frequency distributions of slope deposits show lognormal-like distributions. The rank-frequency plots of slope failure deposits at all sections have a sharp bend at 3 mm. The bed-thickness frequency distribution of flood-induced slope failure deposits does not fit the power-law and lognormal distributions. However, with the exception of slope failure deposits along the slope, the recurrence intervals of all types of events in both formations correspond to Poisson distributions.

With the exception of the uppermost layer, frequencies of flood and slope failure deposits in both sections of the Hiruzenbara Formation exhibit a similar stratigraphic pattern. However, the frequency and thickness of the event deposits in the central section of the lake are greater than those along the slope of the lake slope. In the Miyajima Formation, the frequency of “double couplet”, event frequencies and their stratigraphic patterns differ between the upper 450-year interval and the lower 720-year interval. “Double couplet” and non-erosional sediment gravity flow deposits dominate in the upper interval, whereas the lower interval is characterized by erosional sediment gravity flow deposits with only few “double couplets”.

Thick flood deposits with an erosion base are likely to be hyperpycnites because they consist of inflow materials and have an internal erosion surface. The upper unit of such deposits has thin subunits with weak erosional surfaces, suggesting that they were deposited by a fluctuating hyperpycnal flow. Pinching out of the lower unit indicates that a flood flow deposited the upper unit and therefore it covers a larger area of the basin. This observation reveals that the deceleration flow that deposits the upper unit has a longer discharge duration than the acceleration flow that deposits the lower unit. Flood-induced non-erosional sediment gravity flow deposits are mainly composed of inflow materials and have good continuity without any erosion surfaces; therefore, these deposits correspond to hypopycnites spreading along the water surface and settling to the lake floor, or homopycnites mixing with lake water. Non-erosional flood deposits without lateral continuity are likely to have been deposited by more dilute sediment gravity flows that can easily diffuse and show discontinuous deposition. Slope failure deposits including flood-induced slope failure deposits are composed of “background” varved diatomite clasts and show significant facies changes with large basal erosion. Additionally, its sedimentary character changes from clasts or blocks of varved diatomite dominated slump-like deposits to massive structureless deposits in the lateral direction. This facies change suggests that a debris flow generated by slope failure of the lake might have resulted in a more dilute turbidity current and subsequent deposition of different materials at different densities on each setting.

Flood events are interpreted as self-similar inverse cascades, and therefore it is thought that flood magnitude (flood discharge) follows a power-law distribution. As the bed-thickness frequency distribution of flood deposits in this study follows a power-law distribution, it likely reflects flood magnitude (flood discharge). In the Hiruzenbara Formation, the inclinations of the rank-frequency plots for the central section of the lake changes at 6 mm. That is caused by the presence of several thick beds at the central section of the lake. It is thought that topographical features, such as the slope of the lake floor, affect the depositional process in this section.

It is suggested that the magnitude and frequency of earthquakes exhibit a power-law relationship. However, bed-thickness frequencies exhibited lognormal distributions in this study, and therefore they did not directly reflect earthquake magnitudes. The slopes of the rank-frequency plots change at 3 mm, indicating that deposits with thicknesses below 3 mm are rare. Thus, it is possible that small-scale earthquakes do not induce slope failures. When flood and slope failure deposits cannot be identified and distinguished like in the Miyajima Formation, the bed thickness frequency distributions do not exhibit the features mentioned above. Recurrence intervals of flood and earthquakes are thought to follow a Poisson distribution. The

recurrence intervals of bed deposition by these events in the Hiruzenbara and Miyajima formations also follow a Poisson distribution, indicating that flood and earthquake events occur as discrete random natural phenomena, except for sites with incomplete event history records. For instance, because slope-failure induced sediment gravity flow bypassed the lake slope and did not preserve the sedimentary bed, slope-failure deposits along the lake slope in the Hiruzenbara Formation do not follow a Poisson distribution.

The frequency and thicknesses of sediment flow deposits in the Hiruzenbara Formation along the slope and in the central section show a similar stratigraphic pattern. Variations in the uppermost interval indicate differences in lake-filling processes in both sections. The flood deposits might record climatic changes whereas the slope failure deposits might reflect infilling processes of the lake. In the case of the Miyajima Formation, several differences are observed between the upper and lower intervals. In the lower interval, “double couplet” and non-erosional sediment gravity-flow deposits are dominant whereas “double couplets” are rare in the upper interval, which is dominated by erosional sediment gravity-flow deposits. The “double couplet” may be formed via lake water circulation and stratification. In lake environments, hyperpycnites may decline because thermocline formations interrupt hyperpycnal flows going down into deeper parts of the lake. Moreover, varve preservation indicates that lake water circulation occurred only in the upper parts of the lake. Colder climates are suggested in a duration forming “double couplet” in the upper part of the Miyajima Formation. Similar to the Heinrich events suggesting a colder climate in the Dansgaard–Oeschger cycle in the Holocene, the durations were estimated as short-term colder periods that were in a long-term warmer period. In the upper part of the Miyajima Formation including “double couplet”, many flood events causing sediment gravity flows were suggested due to heavy snowfalls in colder winter involving meltwater floods in the spring season, except for the uppermost 300 years.

審査の結果の要旨

地層中に記録された様々な過去のイベントを時系列的に解析することは、地球科学、特に層序学、堆積学、古環境学における普遍的な研究トピックであるが、多くの研究では時間軸の精度が 1000 年から 100 万年という、いわゆる「地質学的時間スケール」での解析が主体である。地層記録の中でも湖成堆積物は、地震や洪水などを原因としたイベント層の良い保存媒体であることが知られているが、特に湖成堆積物が珪藻を主体とした年縞からなる場合は、イベント発生頻度やその発生時期に関する地層記録を「1 年」という我々の日常的な時間スケールの中で解析、解釈することができる。佐々木華君の学位申請論文「Study on paleo-flood and slope failure events recorded as lacustrine sediment gravity flow deposits : 湖成重力流堆積物として記録された古洪水・古地震イベントに

関する研究」では、このような湖成年縞堆積物のもつ地層情報特性を生かし、国内の代表的な 2 つの更新統湖成サクセションである岡山県中部の蒜山原層と栃木県北部の塩原層群宮島層を検討することで、1) 湖成層中に認められる重力流堆積物についてその岩相的特徴と側方層相変化を詳細に観察、記載することで起源を特定し、それをもとに堆積過程を考慮したうえで起源の異なる重力流堆積物の識別・認定基準を明らかにする、2) 各重力流堆積物の層厚や発生頻度について統計的な特徴を抽出し、それぞれの起源とイベント発生間隔や規模の関係を明らかにする、3) これら年縞に挟在する重力流堆積物の層序学的変化を検討し、そこから古気候や古環境の変遷を考察する、の 3 点を主眼として研究を行った。

この研究ではまず、蒜山原層、宮島層において詳細な露頭観察、柱状図作成、露頭連続写真の撮影を行い、また柱状試料、剥ぎ取り試料、ブロック試料採取を行った。野外地質データおよび試料の室内解析を通じて明らかになった年縞の枚数をもとに、蒜山原層において 7849 年間の、宮島層において 1177 年間の層序記録を入手した。蒜山原層中には湖斜面側で 193 層の、湖心側で 371 層の洪水性重力流堆積物が、湖斜面側で 36 層の、湖心側で 103 層の崩壊性重力流堆積物が認められ、また宮島層においては 636 層の洪水およびそれが誘発した崩壊性重力流堆積物が確認された。このうち洪水性堆積物は流入性の粒子からなるイベント層で、下面が侵食的なものと非侵食的なものに分けられる。侵食的なものはハイパーピクナイト起源と考えられ、その上部ユニットのみが遠位の（湖心側の）地点まで堆積している。これは、上部ユニットが堆積する流れの減衰段階が、下部ユニットを堆積させる流れの増大期間よりも長いことによると考えられる。蒜山原層では、非侵食的な洪水性堆積物は均質で、薄いにもかかわらず連続性の非常に良いものが認められる。これらはより低密度の洪水流によるホモピクナイトあるいはハイポピクナイトに対応する可能性が指摘できる。蒜山原層において崩壊性と考えられる重力流堆積物はバックグラウンドの年縞堆積物からなり、そのリップアップクラストをしばしば含む。テンペスタイト様の角礫相、変形相堆積物から塊状堆積物へと側方への急激な層相変化を示すため、地震イベントによる斜面崩壊から生じた土石流が混濁流に変化し堆積したものと解釈できる。一方、宮島層に頻繁に挟在する重力流堆積物は、バックグラウンドの湖成堆積物からなる碎屑物と流入性の碎屑粒子を主体とするものがあることから、洪水性および洪水によって誘発された崩壊がその成因と考えられる。従来の湖成堆積物研究でも同様の岩相的特徴を持つイベント層の起源について議論はなされていたが、これらの研究の大半は現世の湖底で掘削されたコア試料を基にしたものであるため、自ずと側方への層相変化の観察には限界があり、イベント層の起源の認定基準は曖昧なままであった。本論文では、野外での詳細な露頭観察にもとづく層相側方変化を把握することで、堆積過程を考慮したうえでの湖成重力流堆積物の起源と認定基準をより明確にすることができた。

次に、重力流を発生させたイベントの規模とその要因について考察した。一般に重力流堆積物の層厚頻度分布はイベントの規模に関連すると考えられており、その起源によって異なる分布を示すことが知られている。これにもとづいて、重力流を引き起こした洪水や地震の周期等が議論されている。本研究では、コアを用いた従来の研究で不確かさが常に残されていた湖成重力流堆積物の起源に関する認定基準が明らかになったことで、より厳密な各イベントの挟在間隔（再来周期）、層厚頻度分布を入手することができた。このうち、蒜山原層の洪水性重力流堆積物は、起源である洪水と同様のべき分布に類似した層厚頻度分布を示した。このことから、洪水性重力流は洪水の規模そのものを直接反映している可能性が考えられる。同時に Rank frequency plot の解析から、蒜山原層を堆積させた湖では湖心側に比較的厚い層が堆積するような地形が形成されていた可能性を示すことができた。地震の規模（マグニチュード）とその頻度との関係は Gutenberg-Richter 則とよばれ、べき分布を示すことが知られているが、蒜山原層の崩壊性重力流堆積物の層厚頻度分布は期待されるべき分布ではなく、むしろ対数正規分布に近似した分布であった。Rank frequency plot の解析からは、層厚 3mm 以下の薄い崩壊性堆積物は比較的少ないこ

とが読み取れるので、この分布の要因として小規模の地震では湖斜面崩壊が稀にしか誘発されない可能性を指摘することができた。一方宮島層中の、洪水に誘発された崩壊性重力流堆積物では、その層厚頻度分布はべき分布、対数正規分布のいずれをも示さない。従来多くのイベント堆積物の研究で示されているように、宮島層のような厚層厚のイベント堆積物が卓越した、洪水性と崩壊性の重力流堆積物の分離が難しいケースでは、その起源と対応した分布を示さない可能性が示唆される。

考察の最後の項では、検討した湖成年縞堆積物とそこに発達する重力流堆積物の層序学的変化をもとに、それらの第四紀古環境変遷に対する意義について考察した。蒜山原層の洪水性および崩壊性イベントの頻度と層厚分布は、最上部層準を除くと湖心および湖斜面両セクションにおいて類似したパターンを示している。最上部では崩壊性重力流堆積物が減少するが、これは湖の埋積の進行により湖斜面の傾斜が緩やかになり崩壊が発生しにくくなったことと調和的である。また中部層準においては火山灰質の洪水性重力流堆積物が高頻度で挟在するようになる。これは、この時期の蒜山火山の活動により後背地の植生発達が阻害されたことと関連付けることができる。一方宮島層をみると、年に2セットの縞を形成する Double couplet が卓越する層準では、重力流堆積物が下位を侵食しないタイプのものが多く認められる。このような年2回の縞のセットがつくられる特徴的な Double couplet の時期には、湖水中に形成される温度躍層のため湖底に潜り込むハイパーピクナイトの頻度が低下した可能性がある。Double couplet の形成からは、この時期に比較的寒冷な冬の出現が示唆されるが、一方で宮島層堆積時は第四紀古環境学の一般的な理解では間氷期の比較的温暖な時代である。宮島層での層序解析結果を見ると、特にその上部の約450年間の層序記録に Double couplet の発生頻度が高いことから、この期間では気候の寒冷化が示唆される。このような数百年スケールでの寒冷化は、第四紀気候変動で一般に知られているハインリッヒイベントに相当すると考えられる。宮島層の寒冷化層準で興味深いのは、最上部層準を除いて洪水性の堆積物重力流発生頻度が増加傾向を示す点である。気候寒冷化層準での洪水イベントの増加要因としては、より寒冷化した冬の降雪量の増加と春季の融雪による流入の増大が推定されるが、この解釈は宮島層の洪水イベント堆積物の多くが初春にブルーミングの起こる *Stephanodiscus akutsui* を主体とする明色の年縞により直接覆われることとも非常に調和的である。国内の山間地にある中部更新統湖成堆積物を見ると、ハインリッヒイベントを伴う寒冷期に湖面レベルが上昇していることが知られており、その要因として、モンスーンの活性化により日本海からの水蒸気供給量が増大することで降雪量が増えたことが指摘されている。宮島層を含む第四紀山間湖成層中で推定される寒冷な冬の出現と降雪量の増大は、ハインリッヒイベントにより冬季モンスーンが活性化されたことがその要因なのだろう。このような第四紀古環境学的な視点が本研究で新たに提示された。

このように本申請論文では、湖成年縞層中の重力流堆積物の認定基準を新たに構築すると共に、その層序学的解析に基づくイベントの時系列的変化を、地層記録が非常によく残された代表的な本邦更新統湖成堆積物である蒜山原層および宮島層において一つの典型的な事例として考察した。更にそこから得られた情報をもとに第四紀環境変動に関する新知見をもたらした点で学術的意義が認められるものであることから、本審査委員会では学位論文に値するものと判定した。