ハタノ　ノゾミ
葉田野　希

共同研究者

川野　律歩
（信州大学大学院 理工学研究科　修士課程）

吉田　孝紀
（信州大学理学部　教授）

略　歴

2013年　3月	信州大学理学部 地質科学科 卒業
2015年　3月	信州大学大学院 理工学系研究科 修士課程　修了
2018年　9月	信州大学大学院 総合工学系研究科 博士課程　修了
2018年 10月	信州大学理学部 アソシエイト研究員
2019年　4月	長野県環境保全研究所 自然環境部　技師 現在に至る

地球温暖化が土壌―湖沼環境に及ぼす影響：更新世末湖沼堆積物に基づく実証研究

本研究では、21 世紀末の気候変動による陸上環境影響の実証記録として、更新世末～完新世の湖沼堆積物に注目し、中部日本の内陸盆地の砕屑物供給、化学風化度、湖内の生物一次生産性の時代変遷を追跡することで、それらの気候変動による応答の解明を試みた。研究対象として、温暖化影響を早期に受けやすい中部山岳域に近接し、内陸型気候に特徴づけられる諏訪盆地に注目した。

諏訪盆地の北部に位置する諏訪湖南岸において、最終氷期（約 26,700cal yrs BP）～完新世の堆積物コアを採取した。このコアを対象に、堆積相解析と植物化石の放射性炭素年代測定を行い、堆積環境の時代変遷を明らかにした。このコアの掘削サイト周辺では、約26,700～16,700cal yrs BP に低湖水準期の河川・氾濫原・後背湿地、約 16,700～13,900cal yrs BP に湖進期初期の沼沢地、約13,900～5,700cal yrs BP に湖進期最盛期の湖、約5,700cal yrs BP 以降に高湖水準期のデルタへと堆積環境が移り変わった。約16,700cal yrs BP の低湖水準期から湖進期への転換期には、堆積空間の増加速度と砕屑物供給速度が拮抗することで生じる時間間隙が存在したと考えられ、その変化は緩やかに進行したことが示唆される。諏訪盆地周辺では、約16,700cal yrs BP 以降に化学風化度が増大する。この時期は、諏訪盆地の集水域における森林限界の上昇の時期と一致する。これより、湖進期への転換の要因として、集水域の植生・土壌被覆による砕屑物供給量の減少が考えられる。

本研究の堆積物コアの全有機炭素と全窒素より、約12,200～5,700cal yrs BP に湖内の生物一次生産性が増大したことが明らかとなった。これは、中期完新世最温暖期における湖内の水温上昇によって生じた可能性が示唆される。一方、約 13,900～12,200cal yrs BP には、湖内の生物一次生産性とともに底棲生物活動が低下した。その要因として、北半球規模の寒冷化が考えられる。更新世末～完新世の諏訪湖の生物一次生産性は、気候変動やそれによる副次的要因によって変動した可能性がある。

1. はじめに

21 世紀末の世界の平均気温は、温室効果ガスの排出が多いシナリオにおいて最大 5.7 度上昇する可能性が指摘されている（IPCC, 2021）。この地球温暖化は、東アジア中緯度の沿岸域において、熱帯低気圧やモンスーン強化を促し、降水の頻度増加（Knutson et al., 2010）や長期化（Yamaguchi et al., 2020）を招く。温暖化によって生じる気候的な影響は、陸域において、表層土壌の物理的侵食（Peizhen et al., 2001）、砕屑物や土壌栄養塩類の流出（Leeder et al., 1998）を促す。特に、砕屑物や土壌栄養塩類の流出は、下流域の水圏の生物一次生産性へも影響を及ぼすことが懸念される（Burford et al., 2011）。陸上土壌や水圏の生物活動への温暖化影響を予測することは、喫緊の課題である。

更新世・完新世境界の気候変動は、21 世紀末の温暖化影響のアナロジーとして注目される。なぜなら更新世末には、数～数十年で地球の平均気温が 5 ～ 7 度も上昇する急激な温暖化や寒冷化が生じ（Lowe et al., 2008）、これは今後 100 年以内に生じることが予測されている気温変化の振幅と類似するためである。

本研究では、更新世末～完新世の気候変動による陸上の土壌化・土壌栄養塩類の流出と水圏の生物一次生産性への応答解明を目指す。本報告では、中部日本の諏訪盆地の堆積物記録から、更新世末以降の砕屑物供給、化学風化度、湖内生物一次生産性の時代変遷を追跡し、それらの気候変動による応答を考察した。

2. 研究地域と堆積物コアの概要

諏訪盆地は、冬に寒冷・乾燥化する内陸型気候に特徴づけられ、その堆積物記録は古気候変動に敏感に反応してきたことが期待できる。本盆地北部に位置する諏訪湖は、温暖化影響を早期に受けやすい中部山岳域に近接する高標高湖であり、将来の地球温暖化に向けて対策する上で重要な地域である。

諏訪湖の集水域は、霧ヶ峰高原、北八ヶ岳、赤石山脈を含む（図 1B）。この広大な集水域から、計 31 本の直接流入河川によって土砂が流れ込む。流出河川は天竜川のみである。

諏訪湖南岸において、堆積物コア（ST2020コア；掘削深：30.0m）を採取した（図1B）。ST2020コアは、縦方向に切断し、その断面の粒度、堆積構造、根化石・細根化石等を記載した。計 8 層準から植物片を採取し、AMS 放射性炭素年代測定と IntCal20（Reimer et al., 2020）による暦年較正を行った。ST2020 コアの堆積速度曲線を図 2 に示す。本コアの最深部（深度 30.0m）の較正年代は、更新世末の約 26,700cal yrs BP を示す。また、その堆積速度は、深度 21.28m（約 16,700cal yrs BP）を境に減じ、深度 30.00 ～ 21.28m において 0.84m/10^3yrs、深度 21.28 ～ 11.54m において 0.75m/10^3yrs である。また、本コアから採取された堆積物試料を対象に、全有機炭素（TOC）、全窒素（TN）測定、全岩化学組成分析、レーザー式粒度分布の測定を行った。

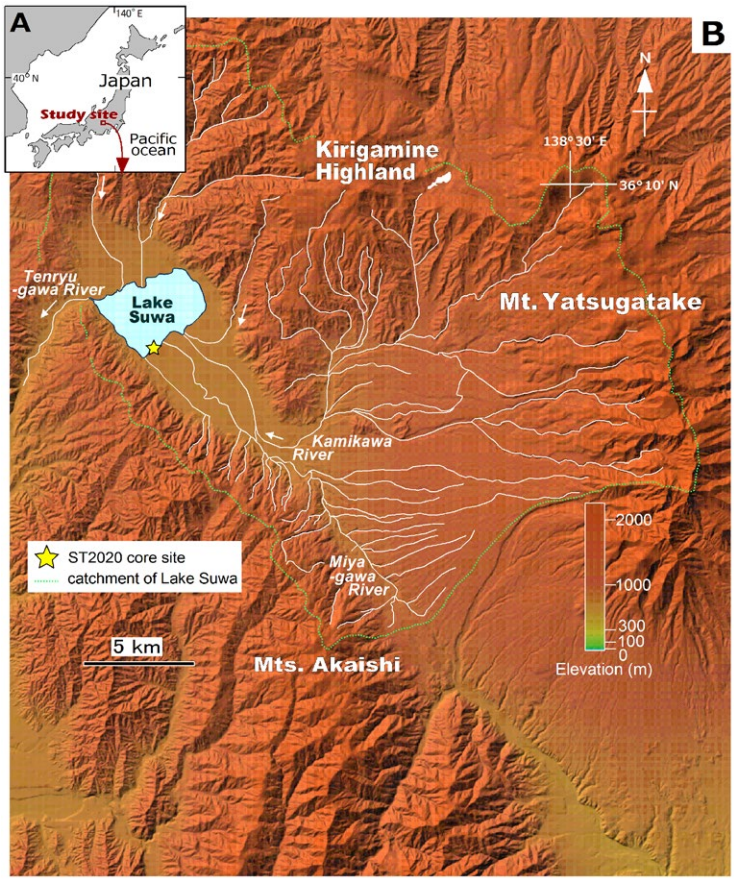

図1（A）インデックスマップ. 研究地域の位置.
（B）研究地域周辺の地形図とST2020コアの掘削サイト（国土地理院発行2.5万分1地形図に加筆）.

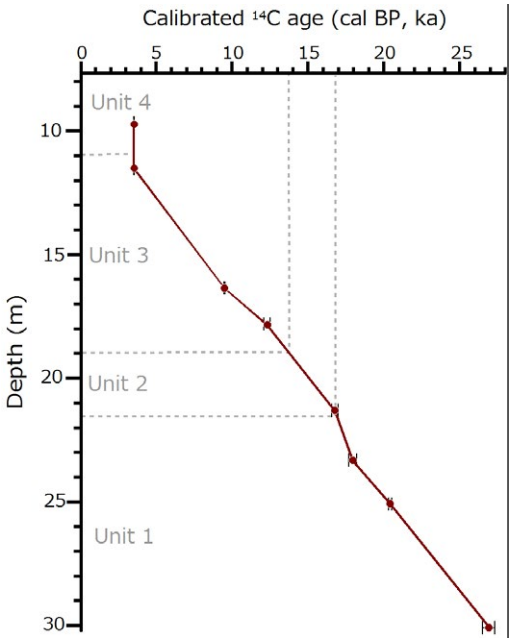

図2 植物化石のAMS放射性炭素年代に基づくST2020コアの堆積速度曲線.

3. 堆積環境

ST2020コアは、表層～深度5.4mまでが盛土・人口改変土からなり、深度5.4以深が礫・砂・泥・亜炭・珪藻質泥から構成される。コアの記載結果を図3に示す。ST2020コアは、以下の４つのユニットに区分できる。

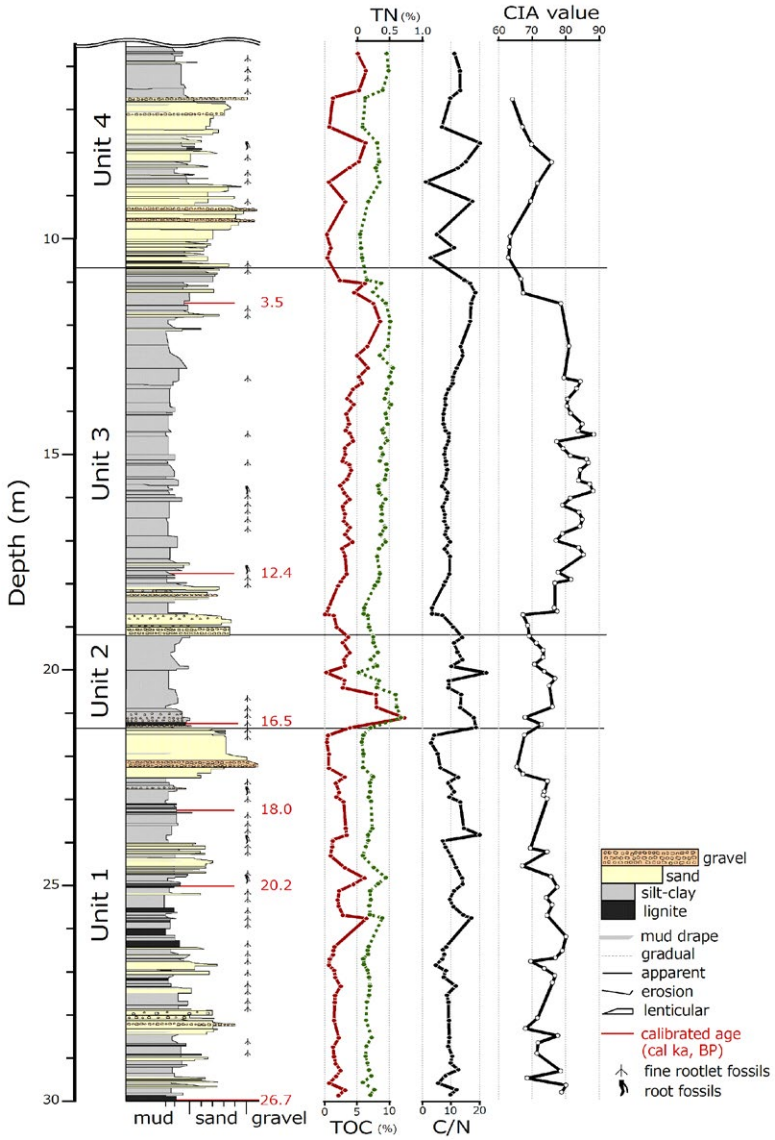

図３ ST2020コアの柱状図とTOC，TN，C/N比およびCIA値.

3. 1. ユニット1（深度30.00～21.34m）

ユニット1の堆積年代は、約26,700～16,700cal yrs BPである。

本ユニットは、砂層優勢砂泥互層からなる氾濫原堆積物（図4A）、正級化砂礫層からなる河川堆積物（図4B）、泥層優勢砂泥互層や亜炭層からなる後背湿地堆積物から構成され、細根化石や根化石を多産する。本ユニットは、低湖水準期の堆積物と解釈できる。

3. 2. ユニット2（深度21.34～19.20m）

ユニット2の堆積年代は、約16,700～13,900cal yrs BPである。

本ユニットは、有機質塊状泥層からなる沼沢地堆積物（図4C）からなる。上方に向かって根化石・細根化石を産する砂混じり泥層から根化石・細根化石を伴わない泥層へと漸移し、TOCが減少することから、陸域から滞水域への上方深化が示唆される。本ユニットは、初期の湖進期の堆積物と解釈できる。

3. 3. ユニット3（深度19.20～10.80m）

ユニット3の堆積年代は、約13,900～5,700cal yrs BPである。

本ユニットは、最下部で不淘汰砂礫層や平行葉理泥層（図4D）を挟む。平行葉理泥層の葉理は、それぞれ菱鉄鉱や砕屑粒子から構成される。これより上位では、珪藻遺骸を豊富に含む有機質泥層（図4E）から構成される。本ユニットの下部の平行葉理泥層（深度19.20～17.94m）では、TOC、TN、C/N比が低い。一方、中部（深度17.70～13.50m）では、C/N比が低い値で小さい振幅を示し、安定した湖の環境を示す。また中部では、上方に向かって根化石・細根化石の出現頻度が減じ、上方深化を示す。本ユニットの上部（深度13.50～10.80m）では、TOCとC/N比が緩やかに増加し、上方粗粒化サクセッションをなすことから、デルタ前進による高等植物由来の有機物供給の増加を示す。本ユニットは、湖進期の堆積物と解釈できる。深度約14.0～13.0m（約6,500～5,300cal yrs BP）は、根化石・細根化石が産出せず、湖域が最も拡大した時期だったといえる。また、この有機質泥層には、珪藻遺骸と菱鉄鉱、砕屑粒子からなる葉理が断続的に存在する。

3. 4. ユニット4（深度10.80～5.40m）

ユニット4の堆積年代は、約5,700cal yrs BP以降と考えられる。

本ユニットは、上方粗粒化サクセッションをなす砂礫層、砂層、砂質泥層から構成され、デルタフロント～デルタプレーンの環境を示す。特に、深度8.90～8.10mと深度6.80～5.40mの上方細粒化サクセッションをなす砂層と砂質泥層では、根化石や細根化石を豊富に産し、TOCとC/N比が増加し、デルタプレーンにおける離水を示す。本ユニットは、高湖水準期の堆積物と解釈できる。

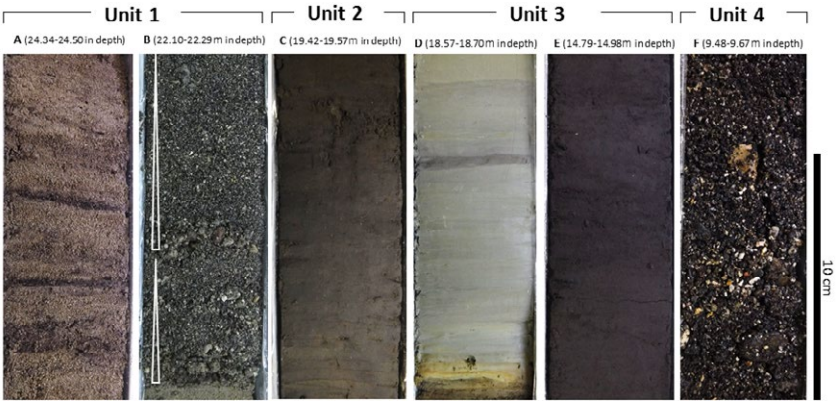

図4 ST2020コアのユニットごとの代表的な岩相.
（A）ユニット1：砂層優勢砂泥互層（氾濫原堆積物）.
（B）ユニット1：正級化砂礫層（河川堆積物）.
（C）ユニット2：有機質塊状泥層（沼沢地堆積物）.
（D）ユニット3：平行葉理泥層（湖成堆積物）.
（E）ユニット3：有機質塊状泥層（池・湖成堆積物）.
（F）ユニット4：不淘汰砂礫層（デルタフロント堆積物）

4. 集水域の化学風化度の変遷

堆積物の後背地における化学風化度の変遷を検討するために、ST2020コアの泥質堆積物を対象に、全岩での主要元素組成から化学風化度（CIA値：Nesbitt and Young, 1982, Al_2O_3/（Al_2O_3 + CaO* + Na_2O + K_2O）×100、CaO*は珪酸塩鉱物由来のCaO）を算出した（図3、5A）。なお、粒径効果を除去するために中央粒径を併せて検討した（図5A）。

ユニット3の湖成堆積物では、類似した粒径をもつ粒子集団ごとに比較して、高いCIA値（平均82.36）を示す（図5A）。特に、深度16.0～13.0m（約9,000～5,300cal yrs BP）では、最も高いCIA値を示す。この値は、宮川と上川の現世の懸濁泥の値（69.91～76.11, 平均73.47；葉田野, 印刷中）と比較しても高い。

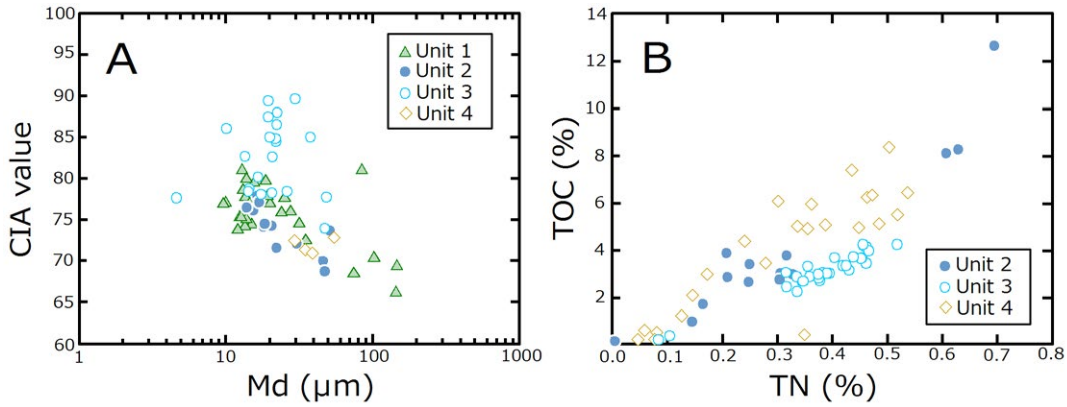

図5（A）ST2020コアの堆積物における中央粒径（Md）ー化学風化度（CIA値）図.
（B）ST2020コアの堆積物における全窒素（TN）ー全有機炭素（TOC）図.

5. 湖内の生物一次生産性の変遷

TOC、TN、C/N比をもとに、湖内の生物一次生産性の変遷について考察する。ユニット2（約16,700～13,900cal yrs BP）とユニット3の中部（約12,200～5,700cal yrs BP）では、C/N比が低く（図2、5B）、湖内の生物一次生産性が増加したことを暗示する。特に、ユニット3の深度18.0～15.8m（約12,300～8,700cal yrs BP）では、C/N比が7から8の間で安定しており、湖内の生物一次生産性が維持されていたことを示す。約13,900～12,200cal yrs BPの平行葉理泥層では、それより下位と比べてTOCとTNが急激に低下する。この泥層は、珪藻などの生物遺骸を含まず、砕屑物からなる葉理が保存されていることから、底棲生物活動がなく、湖内の生物生産性が著しく低下したことを表す。また、生物生産性の低下は急激に生じたと考えられる。

6. 議論

6. 1. 気候変動によって規制された堆積システムの変遷

ST2020コアでは、最終氷期最盛期から間氷期に向かって、低湖水準期、湖進期、高湖水準期の順に堆積システムが変遷することが明らかとなった。

諏訪盆地のように海洋から離れ独立した内陸盆地において、その堆積システムは、海水準変動の影響を受けにくく、気候とテクトニクスの変動によって生じる堆積空間の変化や砕屑物供給量の変化等によって規定される（Shanley and McCabe, 1994）。これより、ST2020コアの低湖水準期から湖進期への転換の要因として、排水量の減少、砕屑物供給量の減少、流入量の増大が挙げられる。ここでは、これら堆積システムの変遷の要因について考察する。

約16.7kaの低湖水準期から湖進期への転換は、堆積速度の低下を伴う。湖進期初期では、細根化石や根化石が密に産し、TOCが高いことから、砕屑物供給速度の低下による陸上での曝露による時間間隙と植物遺骸の集積による分解の停滞があったと考えられる。これは、堆積空間の増加速度と堆積速度の拮抗による時間間隙の存在を暗示する。これより、低湖水準期から湖進期への移行は、緩やかに進行したと考えられ、土石流などによる排水口のせき止めや断層運動に伴う河床勾配の変化による排水量の減少などはその要因として考えにくい。

約16.7kaは、更新世末の融氷期に相当する（図6）。諏訪盆地の集水域の霧ヶ峰高原では、沼沢地の花粉化石から、17～14kaに木本植物の花粉化石の集積速度；（森林限界の指標）が急増し、

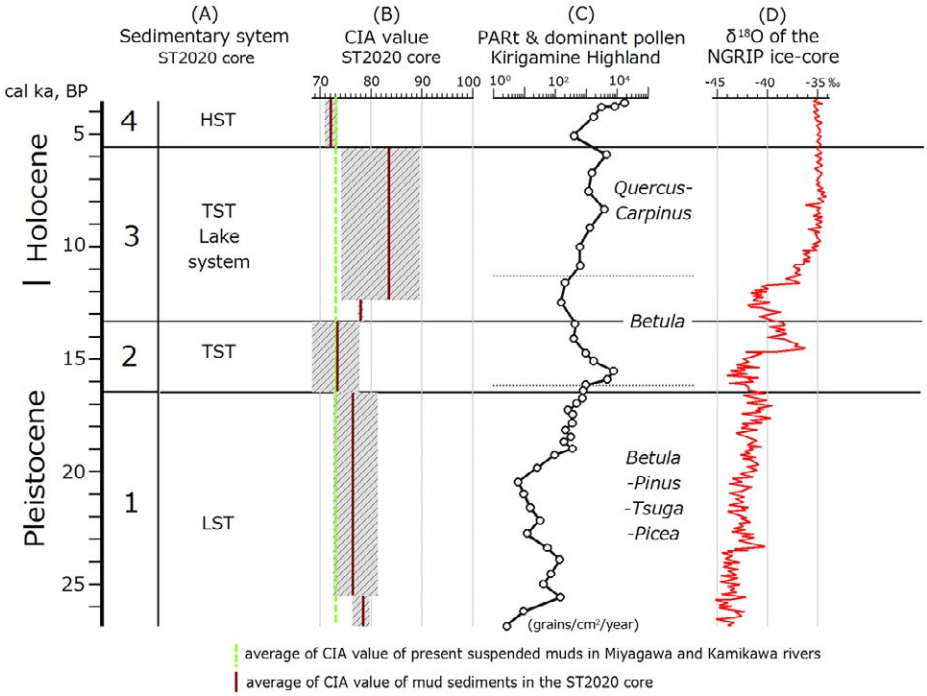

図6（A）ST2020コアの堆積ユニット. LST: 低湖水準期, TST: 湖進期, HST: 高湖水準期.
（B）ST2020コアのCIA値（川野ほか, 2021）. 宮川・上川の現世懸濁泥のCIA値は, 葉田野（印刷中）を引用.
（C）霧ヶ峰高原沼沢地コアにおける花粉化石帯とPARt（木本植物の花粉化石の集積速度）（Yoshida et al., 2015）.
（D）グリーンランド氷床コアの酸素同位体比（Lowe et al., 2008）.

遷移植物の *Betula* や *Conifers* が優勢になった（Yoshida et al., 2015；図6）。これより、この期間に森林限界が標高1,400 m以上に上昇したと考えられている。また、集水域の化学風化度は、湖進期初期のユニット2から湖進期のユニット3にかけて高い値を示す。一般に、植生・土壌被覆は、土壌の物理的侵食と流出を抑制する（Milliman and Farnsworth, 2011；Zhao et al., 2013）。集水域の森林限界の上昇、裸地面積の縮小と植生・土壌被覆が、砕屑物の流出の減少に寄与した可能性が考えられる。

また、東アジア・夏季モンスーンは、約14.7kaに強化しはじめ、そのピークの約7.8～5.3kaの降水量は、現在より3倍に増加したとされる（Chen et al., 2015）。ST2020コアの湖進期において、湖域が最も拡大した約6.5～5.3kaは、そのピークに重なり、降水量の増大が諏訪盆地への流入量を増加させ、湖水位を上昇させた可能性もある。

以上のように、ST2020コアにおける低湖水準期から湖進期への堆積システムの変遷は、集水域の植生・土壌被覆による砕屑物供給の減少や流入量の増加によって生じた可能性がある。

6. 2. 湖内生物一次生産性の変動

ST2020コアのTOCとTNより、更新世末～完新世にかけて、湖内の生物一次生産性が変動したことが明らかとなった。諏訪湖では、1991～1994年に測定されたクロロフィルaの年間総生産量が、1993年の冷夏に減少を、猛暑の1994年夏に顕著な増加を示す（Park et al., 1998）。これより、諏訪湖の植物プランクトンの生産量は、水温に支配されると考えられている。水温変化は、ST2020コアの生物一次生産性の変動の主な要因として挙げられる。

ユニット2（約16.7～13.9ka）とユニット3の中部（約12.2～5.7ka）では、湖内の生物一次生産性が増加した。特に、約12.2～5.7kaは、中期完新世最温暖期（Xiao et al., 2004；Park et al., 2019）と部分的に重なる。一方、生物一次生産性が低下した時代（約13.9～12.2ka）は、福井県の水月湖の花粉化石（Nakagawa et al., 2005）からも報告されているように北半球の寒冷期として知られる。更新世末以降の諏訪湖の生物一次生産性は、気候変動に伴う湖内の水温変動やそれによって生じる副次的要因によって変動してきた可能性がある。

7. 最後に

本研究では、諏訪盆地を例に、最終氷期最盛期以降の陸上環境変動とそれらの気候変動応答を考察した。最終氷期末に開始した温暖化は、諏訪盆地周辺において、植生・土壌被覆と流入量の増大を招き、砕屑物供給と堆積システムに寄与した可能性がある。これは、気候変動、特に温暖化による植生・土壌被覆の変化が土砂流出量を規定することを暗示する。ただし、土壌生成やその遷移には、数百年～数千年と中長期的な時間を要する（Sheldon and Tabor, 2009）。したがってこの変動は、現在～将来に予測される急激な地球温暖化による環境影響の類推には直接的に適用できないかもしれない。

諏訪湖の生物一次生産性の変動は、更新世末の温暖化や寒冷化と調和的であり、急激な気候変動に伴う湖内の水温変化等に鋭敏に反応してきた可能性がある。今後は、水温変化だけでなく、湖内の酸化還元状態や湖水位変動など、その他の要因を併せて検討する必要がある。また、本報告のコアにおいて、葉理をもつ湖成堆積物が断続的に存在することが明らかとなった。これら葉理は、

菱鉄鉱や砕屑粒子、有機物、珪藻遺骸によって構成されており年縞の特徴と類似する。これを対象に、数年～数十年程度の時間間隔で気候変動応答を解明することが可能かもしれない。

現在進行している地球温暖化は、主に人間活動による温室効果ガスの排出量の増加が招いているとされ（IPCC, 2021）、更新世末の自然発生的な気候変動とは、その要因や変化速度が異なる。それでも、更新世末の気候変動による環境応答の履歴は、有史以降の人類が記録・経験していない変動であり、地質記録からしか得られない。本研究は、既存の有史以降の観測記録に、地質時代の環境変動の履歴を継ぎ足し、中長期的な環境影響を予測し対策するための基礎データになると思われる。また、過去の環境変動を現在とは無縁のものとせず、現在の環境が成立するまでの一連の履歴として捉えることは、将来の環境を考える上で重要である。今後は、これら研究成果の発信に努めていきたい。

8. 謝辞

本研究の実施にあたり、公益財団法人アサヒグループ学術振興財団に助成を賜りました。研究報告の執筆に際して、選考委員ならびに役員の方々には、有意義なご助言を賜りました。コアの掘削は、株式会社中部測地研究所によって実施されました。コアの半裁に際して、株式会社北信ボーリングの方々にお世話になりました。AMS 放射性炭素年代測定と暦年較正は、山形大学高感度加速器質量分析センターと株式会社パレオ・ラボに依頼しました。全岩化学組成、TOC・TN 、粒度分析に際して、高知大学海洋コア総合研究センター（以下、高知コアセンター）の新井和乃博士、池原 実教授、松崎琢也博士、浦本豪一郎博士、山本裕二博士にご教示いただきました。高知コアセンターの公文富士夫客員教授には、本研究の全般にわたってご助言をいただきました。本データの一部は、高知コアセンター令和２年度全国共同利用（採択番号 20A018・20B016）によって得られました。本研究は、長野県環境保全研究所の「長野県内の湖沼とその集水域における土壌環境の中長期的保全・管理に向けた調査研究」の一環として実施しました。以上の方々と関係者の方々に御礼申し上げます。

9. 引用文献

Burford, M.A., Revill, A.T., Palmer, D.W., Clementson, L., Robson, B.J., Webster, I.T., 2011. River regulation alters drivers of primary productivity along a tropical river-estuary system. Marine and Freshwater Research 62, 141–151.

Chen, F., Xu, Q., Chen, J., Birks, H.J.B., Liu, J., Zhang, S., Jin, L., An, C., Telford, R.J., Cao, X., 2015. East Asian summer monsoon precipitation variability since the last deglaciation. Scientific Reports 5, 11186.

葉田野　希, 2022 . 諏訪湖流域における河川堆積物の全岩化学組成 . 長野県環境保全研究所研究報告 18, 印刷中.

IPCC, 2021. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (Eds.)]. Cambridge University Press.

川野律歩・葉田野　希・吉田孝紀, 2021. 最終氷期以降における諏訪盆地周辺の風化環境の変遷. 信州大学環境科学年報 42, 53–56.

Knutson, T.R., McBride, J.L., Chan, J., Emanuel, K., Holland, G., Landsea, C., Held, I., Kossin, J.P., Srivastava, A.K., Sugi, M., 2010. Tropical cyclones and climate change. Nature Geoscience 3, 157–163.

Leeder, M.R., Harris, T., Kirkby, M.J., 1998. Sediment supply and climate change: implications for basin stratigraphy. Basin Research 10, 7–18.

Lowe, J.J., Rasmussen, S.O., Björck, S., Hoek, W.Z., Steffensen, J.P., Walker, M.J.C., Yu, Z.C., INTIMATE group, 2008. Synchronisation of palaeoenvironmental events in the North Atlantic region during the Last Termination: a revised protocol recommended by the INTIMATE group. Quaternary Science Reviews 27, 6–17.

Milliman, J.D., Farnsworth, K.L., 2011. River Discharge to the Coastal Ocean: A Global Synthesis. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 392p.

Nakagawa, T., Kitagawa, H., Yasuda, Y., Tarasov, P.E., Gotanda, K., Sawai, Y., 2005. Pollen/event stratigraphy of the varved sediment of Lake Suigetsu central Japan from 15,701 to 10,217 SG vyr BP (Suigetsu varve years before present): Description, interpretation, and correlation with other regions. Quaternary Science Reviews 24, 1691–1701.

Sheldon, N.D., Tabor, N., 2009. Quantitative paleoenvironmental and paleoclimatic reconstruction using paleosols. Earth-Science Reviews 95, 1–52.

Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. Nature 299, 715–717.

Park, H.D., Iwami, C., Watanabe, M.F., Harada, K., Okino, T., 1998. Temporal variabilities of the concentration of intra- and extracellular microcystin and toxic Microcystis species in a hypertrophic lake, Lake Suwa, Japan (1991–1994). Environmental Toxicology and Water Quality 13, 61–72.

Park, J., Park, J., Yi, S., Kim, J.C., Lee, E., Choi, J., 2019. Abrupt Holocene climate shifts in coastal East Asia, including the 8.2 ka, 4.2 ka, and 2.8 ka BP events, and societal responses on the Korean peninsula. Scientific Reports 9, 10806.

Peizhen, Z., Molnar, P., Downs, W.R., 2001. Increased sedimentation rates and grain sizes 2–4 Myr ago due to the influence of climate change on erosion rates. Nature 410, 891–897.

Reimer, P.J., Austin, W.E., Bard, E., Bayliss, A., Blackwell, P.G., Ramsey, B.C., Butzin, M., Cheng, H., Edwards, R.L., Friedrich, M., Groots, P.M., Guilderson, T.P., Hadjas, I., Heaton, T.J., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kromer, B., Manning, S.W., Muscheler, R., Palmer, J.G., Pearson, C., van der Plicht, J., Reimer, R.W., Richards, D.A., Scott, E.M., Southon, J.R., Turney, C.S.M., Wacker, L., Adolphi, F., Büntgen, U., Capano, M., Fahrni, S.M., Fogtmann-Schulz, A., Friedrich, R., Kohler, ¨ P., Kudsk, S., Miyake, F., Olsen, J., Reining, F., Sakamoto, M., Sookdeo, A., Talamo, S., 2020. The IntCal20 northern hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). Radiocarbon 62, 725–757.

Shanley, K.W., McCabe, P.J., 1994. Perspectives on the sequence stratigraphy of continental strata. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 78, 544–568.

渡辺義人, 1997. 2 水質の変遷. アーバンクボタ 36 特集：諏訪, 久保田鉄工株式会社（編）, 12–19.

Xiao, J.L., Xu, Q., Nakamura, T., Yang, X., Liang, W., Inouchi, Y., 2004. Holocene vegetation variation in the Daihai Lake region of north-central China: a direct indication of the Asian monsoon climatic history. Quaternary Science Reviews 23, 1669–1679.

Yamaguchi, M., Chen, J.C.L., Moon, I.J., Yoshida, K., Mizuta, R., 2020. Global warming changes tropical cyclone translation speed. Nature Communications 11. https://doi.org/10.1038/s41467-019-13902-y

Yoshida, A., Kudo, Y., Shimada, K., Hashizume, J., Ono, A., 2015. Impact of landscape changes on obsidian exploitation since the Palaeolithic in the central highland of Japan. Vegetation History and Archaeobotany 25, 45–55.

Zhao, G., Mu, X., Wen, Z., Wang, F., Gao, P., 2013. Soil erosion, conservation, and eco-environment changes in the Loess Plateau of China. Land Degradation and Development 24, 499–510.