

電磁気による河川堆積物の研究— 地中レーダによる構造探査および 地磁気年代推定法の有用性の検討

酒井 英男¹・泉 吉紀¹・手計 太一²・福岡 捷二³

Study on river sediments using ground-penetrating radar and remanent magnetization

Hideo SAKAI¹, Yoshinori IZUMI¹,
Taichi TEBAKARI² and Shoji FUKUOKA³

Abstract

Structure and age of sediments play an important role in determining the sedimentation of a river. We plan on combining a nondestructive survey on the structure of riverbed and its effective dating to investigate the soil movements, specifically during flood events.

Here, we applied ground-penetrating radar (GPR) to analyze the sedimentary structure of a riverbed. At the Ida River in Toyama city, the GPR prospecting with a 250 MHz antenna was applied to investigate the sedimentary structure down to a few meters depth from the riverbed surface. After the survey, the sediment of the riverbed was bored into, and the boundary between sand and gravel, and cobble stones was identified at a depth of 1.4 meters. In the GPR profile, the difference of reflections was detected at about the same depth, which showed that GPR prospecting was useful for studying the shallow riverine subsurface sedimentary.

Formerly, very few studies dealt with the age of the riverbed, especially for the flood sediments. We applied a geomagnetic dating method on the flood sediments found at the Imaichi archaeological ruin of Toyama city, around the old Jinzu River. The magnetic study using remanent magnetization successfully revealed that the sediments were formed in 1900-1950, which suggests a correlation with the 1914 flood event at the old Jinzu River. The geomagnetic dating method is useful for the past flood events independent from the study by paleogeography. We will further improve the efficiency of magnetic dating and GPR prospecting methods to examine the deposition history of flood events.

¹ 富山大学理工学研究部
Graduate School of Science and Engineering, University
of Toyama

² 富山県立大学工学部環境工学科
Department of Environmental Engineering, Toyama
Prefectural University

³ 中央大学研究開発機構
Research and Development Initiative, Chuo University

本報告に対する討議は平成 30 年 2 月末日まで受け付ける。

キーワード：河床，地中レーダ探査，洪水堆積物の年代推定，地磁気

Key words: river bed, ground penetrating radar, dating of flood sediment, geomagnetism

1. はじめに

河川の堆積物に関する研究では，堆積の構造と年代は重要な情報である。従来，河床の表層については音響測深器等で研究されているものの，より深部の堆積物の状況は，研究が容易でなかった。河床下の堆積状況は，過去の洪水氾濫の研究においても必要である。ただ洪水の際には，河床が削られた後で新たな堆積があるので，河床表面の変化の調査だけでは，実際に洪水により河床が削られた跡（洗掘），およびその後で堆積した堆積物の評価は難しい。こうしたことから，河床堆積物について表層の観測や調査と共に，深部の堆積状況の調査が必要と考えられ，非破壊の調査が望まれていた。音波探査でもエアガン等のソースを用いて堆積構造は研究できるものの，大がかりとなる。

本研究では，装置は大きくなく効率の良い地中レーダ探査の研究法を用いて，河床浅部の堆積状況の調査を考えた。従来，著者等は遺跡や雪氷等を中心にレーダ探査を行っており（中條他，2011；泉・酒井，2014；Izumi et al., 2015），池の堆積物に関する探査も実施している（酒井他，2002）。

過去の河床や洪水堆積物については，その年代が求められると堆積過程や洪水の履歴の研究が進展する。洪水堆積物の年代は，観測データが無い時代における洪水被害の貴重な情報となる。それ故，有効な年代推定法が開発されれば，従来は主に古文書を基に行われている過去の洪水の研究に

おける，独立した有用な研究方法となる。年代推定は，更に堆積構造の研究と併せることで土砂移動の研究にもつなげることができる。本稿では，従来，あまり行われていない河川堆積物の年代推定の研究に，堆積物の磁性（Tarling, 1983等）を用いる研究の利用を考えた。

最近，考古学調査において，遺構でも洪水性堆積物が頻繁に見つかっている。同一遺構での違う場所や離れた遺構で，目視で対応が検討されている洪水性堆積層を，磁化研究による年代から検討できると，その信頼性を高められる。そして，堆積層の分布から氾濫状況も検討できる。河川での洪水性堆積物においても，探査により堆積物の状況を探り，上流・下流部の幾つかの地域において，堆積層を採取して年代を決めることで，土砂移動が解析できる。

以上の目的において，本稿では，河床堆積物の堆積状況の地中レーダ探査による研究および，堆積物の年代の磁化研究の，それぞれの有用性を検討することにした。

福岡（2005）に示されている様に，洪水に関して多くの研究が行われており，成果が挙げられている。本研究の探査と堆積物の磁化研究は，従来の研究を補完し，河道の設計にも有用な情報源となると考えられる。研究は，図1の富山県の神通川流域において実施した。

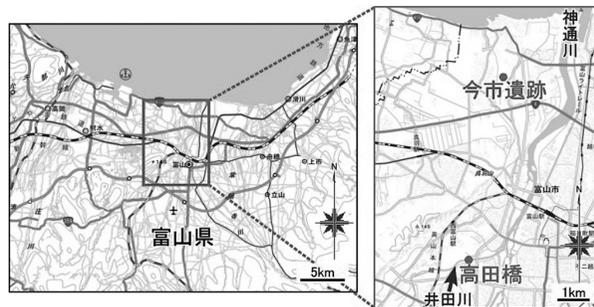


図1 調査箇所（国土地理院の電子地図より引用・加筆）

(1) 河床堆積物の構造の調査

神通川左支川の一級河川である井田川において、レーダ探査により河床の堆積状況を調査した。調査後に、国土交通省富山工事事務所により河床の掘削が行われたので、得られた堆積物コアを観察し、堆積状況と探査結果との対比を行った。

(2) 過去の洪水堆積物の年代推定

富山市の今市遺跡において、発掘調査により見つかった過去の洪水堆積物を対象に、残留磁化を用いる堆積年代の研究を行った。研究の一部は酒井・名古屋(2012)で報告しているが、新たな資料を加えて検討した。

2. 調査方法と調査地域

2.1 地中レーダ探査

地中レーダ探査 (Ground Penetrating Radar: GPR) は、地表から電磁波を放射し、誘電率の異なる境界で反射した電磁波を受信して地下の状況

を調査する(図2)。本研究では、船にレーダ探査機器を載せて川を横断し、河床の表面および河床下の堆積状況を調べる探査を行った。使用したレーダ波の周波数は、250 MHz である。

2.2 堆積物の残留磁化

土壌や岩石には、永久磁石の性質を有する磁鉄鉱や赤鉄鉱等の強磁性鉱物が重量で数%含まれており、こうした物質は形成時に当時の地磁気の記録となる残留磁化(磁化)を獲得している。磁化と地磁気は、図3(a)の様に、方向(偏角・伏角)と強度の3成分で示される。

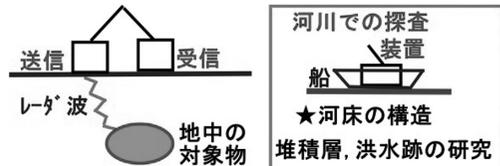


図2 探査法と河床での探査

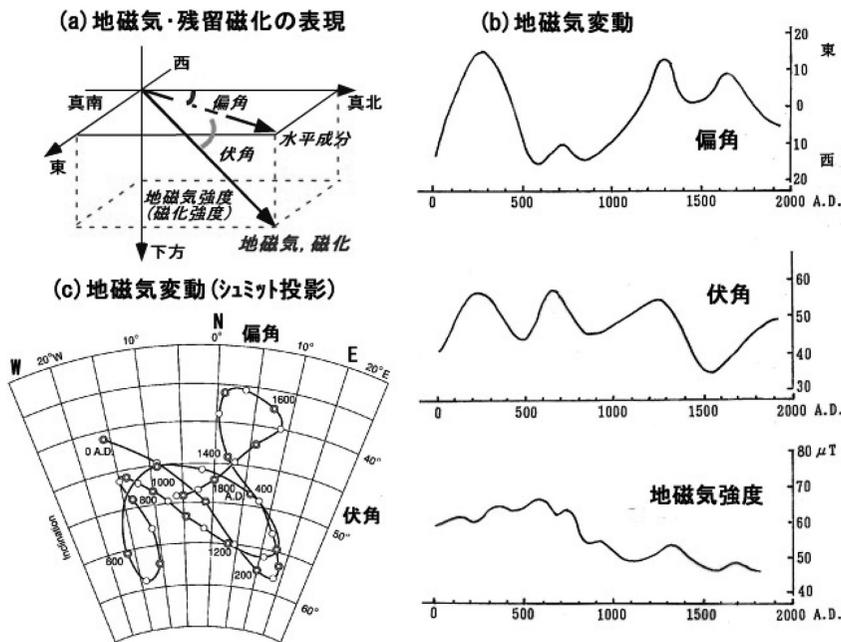


図3 (a)：偏角・伏角と強度，(b)：地磁気の過去2000年間における変化，(c)：地磁気方向の変化の拡大シュミットネット上での表示。(b)は Sakai and Hirooka (1986)，(c)は Hirooka (1971) より抜粋加筆した。

地磁気は地球中心核の運動で生じており、時間につれて変化している。国内の遺跡の焼土等の磁化研究が行われており (Hirooka, 1971; Sakai & Hirooka, 1986; 酒井他, 2016等), その結果を図3 (b), (c) に示す, 過去2000年間の地磁気変化が求められている。それ故, 年代が未詳の対象物について磁化を測定して, 地磁気変化と対比することで年代が推定できる。条件が良い場合, 数十年の精度での年代推定が可能となっている。

海や湖の堆積物に含まれる磁性鉱物は, 水中で攪乱された後, 沈降して底に沈積する際に, その磁化方向を地磁気に向けて堆積する。こうして獲得される堆積残留磁化を利用して, 堆積物の年代が研究されている (Tarling, 1983; Kashiwaya et al, 2001; Sakai et al., 2005等)。

河川起源の堆積物については, 研究は従来あまり無いが, 海・湖と同様に地磁気の記録となった堆積残留磁化を有し, 年代の研究も可能と考えられる。

本研究で対象とする遺跡の洪水堆積物は, 下位層の出土遺物等より, 近世以降の形成と推測されていたので, 年代研究では図3 (c) の地磁気変化における1600年以降の変化を利用することにした。ただ研究を行う富山市 (36.7° N, 137.2° E) は, 地磁気変化の基準点の京都 (35° N, 135.9° E) とかなり離れている。地磁気は場所により違い, 特に緯度による伏角差の考慮が必要である。そこで, 磁化を地磁気変化と対比して年代を推定するにあたり, 京都の地磁気変化から仮想磁極 (VGP) を求め, 富山の地磁気変化に変換して利用するこ

とにした。この方法により, 富山の地磁気変化の伏角は京都に比べて, 約1.7° 深くなった。

3. 富山市井田川の河床堆積物のレーダ探査

探査結果の解析では, レーダ波の往復に要した伝搬時間と反射波の強度から求めた断面図 (GPR profile) を用いた。同図では, 縦軸に伝搬時間と深度, 横軸に測線距離を取っており, 反射波の正負成分を色分けし, 反射強度を濃淡で表現している。レーダ波の伝搬速度については, 下記の式(1)より調査時の河川の水温 (18.6°C) における比誘電率を求めて, 式(2)で計算した。そして得られた速度, $V=0.033 \text{ m/ns}$ を式(3)に代入して, 探査深度 (d) の解析に使用した。

$$\varepsilon_r = 88.15 - 0.414T + 0.131 \times 10^{-2} T^2 - 0.046 \times 10^{-4} T^3 \quad (1)$$

(T : 水温)

$$V = \frac{C}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (2)$$

(C : 真空中の電磁波速度 [m/ns])

$$d = \sqrt{\left(\frac{V \cdot t}{2}\right)^2 - \left(\frac{x}{2}\right)^2} \quad (3)$$

(t : 往復反射時間 [ns],
 x : アンテナ間距離 (0.279) [m])

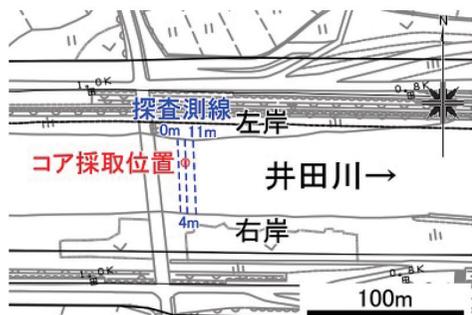


図4 探査の範囲と状況

3.1 探査結果

図5は、上流側の基準測線上(0 m地点)における探査結果の断面図を示している。黒破線で示す様に河床面が明瞭に把握でき、距離32-36 mでは、河床の岩石(礫)による反応が得られた。図6には、0-11 mの設定区間で探査した12本の測線のうちの、4 mと11 m地点の測線で得た結果を示している。図5と同様に河床面が明瞭に把握でき、礫や人工物を示す反応が得られた。

探査結果による河床の形態は数mの範囲でもかなり変化している。これは、河川での調査、例えば流域断面積の調査等において、1、2本の測線での結果を調査範囲の代表とみなすのは難しいことを示している。本研究で実施した程度の範囲での詳細な調査から、平均や代表値を求めること

が望ましいと考えられる。レーダ探査については、約40 m幅の河川での探査は、1測線を15分程で行え、従来の各種調査と併せて十分に利用できる段階にある。

3.2 河床堆積物の掘削コアと探査結果の対比

探査後に国土交通省北陸整備局・富山河川工事事務所により、左岸側の川岸から7.5 m地点(図4に位置を記載)において、河床の掘削が行われて堆積物のコア試料が得られた。そしてコアの断面観察により、河床下1.4 m付近に、礫層と玉石混じり砂層の境界が確認された(図7右)。掘削が行われたのは探査区間4 m地点の測線上7.5 m地点であるが、その周囲6-8 mでの探査profileを図7左に示している。図の、河床下のレーダ

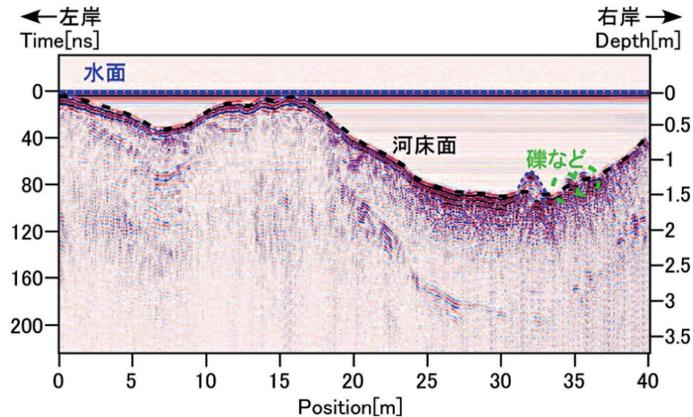


図5 上流側の基準測線での探査結果

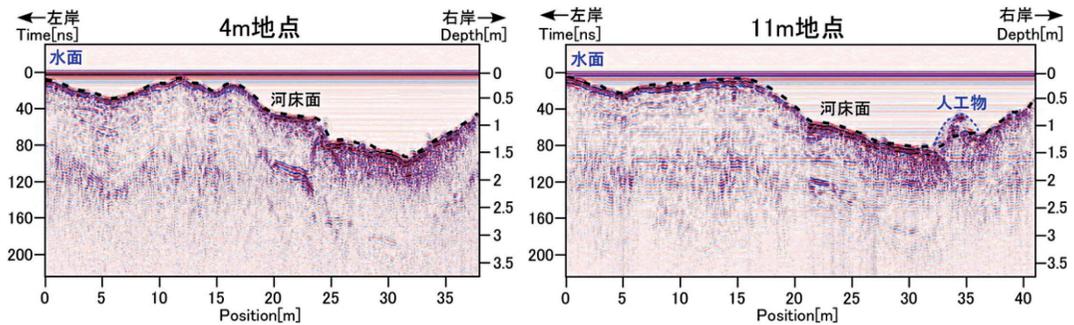


図6 基準測線(0 m)から下流へ4 m, 11 m地点の測線における探査結果

波の伝播速度には、礫の反射に Hyperbola-Fitting (Moldoveanu-Constantinescu and Stewart, 2004) を適用して得た 0.085 m/ns を用いた。探査結果には、地層境界の付近において反射の様相の変化が認められ、また大きな礫や、層の傾斜・乱れを示す反応もあった。以上の結果は、レーダ探査により数 m 深部までの堆積構造が検討できることを示唆している。

従来は水深竿等によって測点毎の水深を計測しているが、図 5、6 に示すように、地中レーダ探査も、河床形態の測量として十分な精度がある。更に河床浅部の堆積状況を共に調査できることは

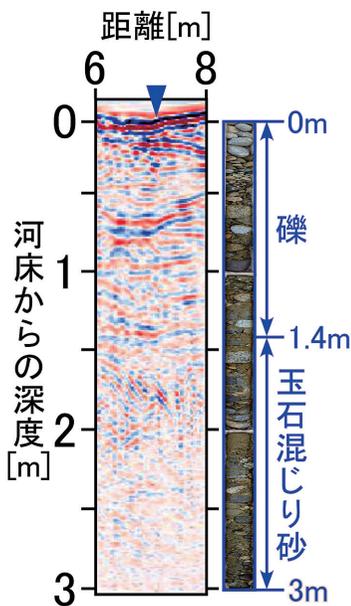


図7 河床下の探査結果とコア試料の比較

同探査の有利な特徴である。また河床の形状を連続的に走査するので、流域断面の精度良い算出にも利用できると考えられる。

今回のコア試料は定方位でなく内部に乱れもあったので、磁化の調査はできなかった。今後、試料の掘削を工夫して、河川堆積物の磁化年代の研究を行う予定である。

4. 富山市今市遺跡の洪水堆積物の磁化の研究

神通川下流・旧流路左岸の河岸段丘に立地する今市遺跡において、平成24年に調査が行われ(富山市教育委員会, 2012), 平安時代の集落跡や江戸時代の遺構と、1942年に建設された国民学校の跡地が発掘された。そして性格不明遺構(SX05)において、旧神通川の洪水時に形成されたと推測される粗砂の堆積層が認められた。この粗砂の層は基本層序にはみられず、遺跡の状況と洪水記録の古文書から、1700-1800年頃の洪水で形成された可能性が指摘されていた。

同層の磁化研究を計画し、試料は、図 8 に示す位置で採取した。試料採取には、容量 7 cc (一辺 2 cm) のプラスチックケースを使用した。まず、発掘面の表層を数 cm 削って発掘作業による乱れを除いた後、ケースを埋め込み、その上面にクリノメーターを用いて現地での方位の指標となる基準線を記した(右図)。そして、ケース上面の走向・傾斜角を読み取った後で試料(ケース)を取り出した。種々の要因による誤差を少なくして磁化の信頼度を高めるために、13個の試料を採取した。



図8 今市遺跡の位置、研究試料の採取場所、遺構と研究試料の採取状況

4.1 磁化測定と交流消磁

堆積物の磁化には、その獲得後に時間経過や変質作用などの様々な要因で二次磁化が付着していることがある。この二次磁化を除くため、交流磁場を作用する交流消磁を行った。消磁は、段階的に磁場を強くし、2.5-50 mT (mT: milli-Tesla, 磁場強度の単位) の範囲の8段階で行った。試料の磁化測定と交流消磁には、富山大学・磁気シールド室のスクイッド磁力計(2G-760R)を用いた。

消磁前の磁化測定において、採取時の土壌の乱れや大きな礫の影響が確認された2試料を除く11個の試料について交流消磁を行い、結果は図9のザイダーベルト図(Zijderveld, 1967)で解析した。この図では、磁化ベクトルを水平成分(NS-EW面)と鉛直成分(NS-UD面)に分解して投影し、鉛直面投影は、白抜きの点、水平面投影は黒点でプロットしている。そして左図の様に磁化を投影後、水平投影面を90度回転して鉛直投影面と重ね

ることで、消磁による磁化の変化を1枚の図で表わすことができる。

中図と右図には、交流消磁の結果の例を、ザイダーベルト図と磁化強度の変化として示した。消磁前の磁化をNRM (natural remanent magnetization) と称している。結果をみると、右図の様に磁化が不安定で、二次磁化が認められた試料もあったが、多くの試料は、中図の様に磁化の変化(プロット)が原点に向ってほぼ直線上に乗っていた。これは、試料が地磁気方向に磁化を獲得しており、その後の二次磁化の付着が少なかったことを示している。この様に安定な磁化が示された試料の消磁結果に、主成分分析法(Kirshvink, 1980)を適用して、磁化方向を算出した。

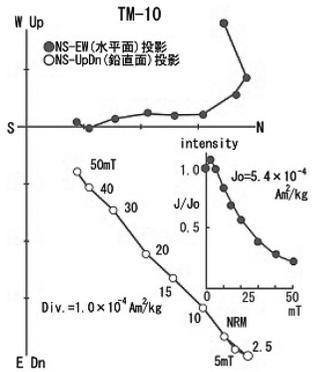
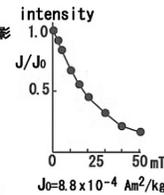
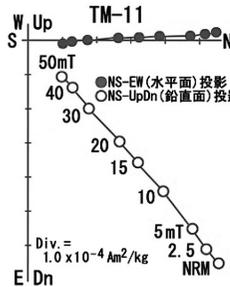
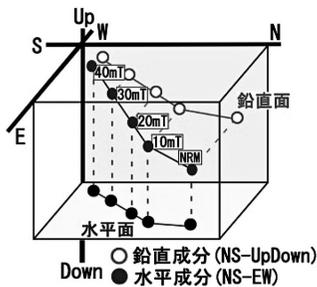


図9 ザイダーベルト概念図(左)と交流消磁の例(中:TM-11, 右:TM-10)

表1 洪水堆積物の試料の平均の磁化

試料数	偏角 (°)	伏角 (°)	方向の信頼度 α_{95} (°)	磁化強度 (A · m ² /kg)
9	-5.7	49.1	3.5	6.26×10^{-4}

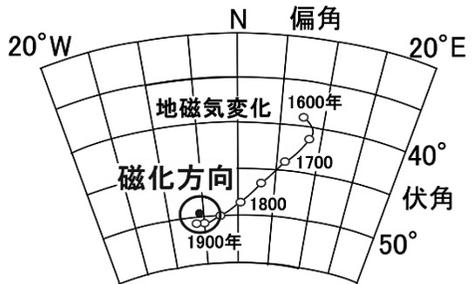


図10 洪水堆積物の磁化方向

ついて、Fisher 統計 (Fisher, 1953) を用いて、平均の磁化方向と磁化強度、方向の信頼角 α_{95} (95% 信頼円) を求めてまとめている。研究した遺構は、出土遺物等から近代以降のものと考えられるため、図10では、磁化方向を1600年以降の地磁気変化と対比している。平均磁化の周りの小円は、 α_{95} 信頼円である。これにより、洪水堆積物の年代は1850年以降であり、1900–1950年に近いと推定された。

その後の調査により、この堆積層に対応する地層において、明治から大正時代に作られたと思われるガラス片が見つかった (片山氏私信)。これは、磁化研究による堆積年代と矛盾は無い。つまり、本研究の結果と併せて、調査した堆積層の年代は、当初考えられていた1700–1800年よりも新しく、1850年以降1900–1950年頃に起きた洪水氾濫による堆積物と考えられた。これに関して、神通川の水害記録を参照すると (富山地方気象台, 1971)、記録が残る水害では大正3年 (1914年) に大きな水害が報告されている。今市遺跡で研究した洪水堆積物は、神通川で起きた大正時代の洪水氾濫により形成された可能性が高い。

本稿で示した地磁気年代研究法は、過去2000年間の対象に適用できる。現在より1000年以上も過去の堆積物も、その時代の地磁気は図3に示される様に大きく変化しており、条件が良いと±20年の精度で年代推定が可能である。歴史時代の洪水や河川の履歴研究において、堆積物の磁化を用いる地磁気年代研究は活用できると考える。

5. まとめ

本研究では、地球電磁気の調査法による河川の堆積状況の研究を、富山県の神通川流域において実施した。

(1) 神通川左支川・井田川での地中レーダ調査

船上にレーダ探査 (アンテナ周波数250MHz) 機器を載せた河川での調査により、河床面と数 m 深部までの堆積状況を把握できた。探査結果には、河床下の堆積構造を示す反応も認められ、探査後に掘削されたコア試料には、探査と調和す

る地層の境界や礫などが確認された。レーダ探査が、河床面と共に、河床浅部の堆積状況の研究において有用であることが示された。本研究の様な河川でのレーダ探査を平静時に定期的 to 実施し、洪水が起きた際に直後に行うことで、洪水に伴う土砂の移動も検討できると考える。

(2) 過去の洪水堆積物の年代研究

旧神通川流域の富山市・今市遺跡において、発掘された洪水堆積物の磁化の研究を行った。従来、地球電磁気学では河川堆積物の磁化研究は殆ど行われていなかったが、安定な磁化が得られ、研究の有用性が示された。磁化方向と地磁気の経年変化との対比から、洪水堆積物の年代として1900–1950年が推定された。その後の調査において、洪水堆積物に対応する地層に、明治から大正時代のものと思われるガラスの破片が見つかり、磁化の推定年代が妥当と確認された。旧神通川では、記録の残る水害として、大正3年 (1914年) の氾濫が知られており、今市遺跡の洪水堆積物もこの時に形成されたものと推定される。

地磁気年代推定法は過去2000年間の対象に適用できるので、古い時代の洪水等の履歴や河川に関連する堆積物の年代研究において活用が期待される。

謝辞

井田川の河床堆積物の研究の一部に、国土交通省河川砂防技術研究開発 (代表、手計太一) の研究助成金を使用した。また同地域の調査において、国土交通省北陸地方整備局富山河川国道事務所にお世話になった。今市遺跡の研究では、鹿島昌也氏 (富山市埋蔵文化財センター) と片山博道氏 (株式会社上智) から、調査での協力と関連資料を頂いた。原稿の作成において、二人の匿名査読者と編集委員の諏訪浩先生には、多くの貴重な助言を頂いた。以上の方々に、深く感謝する。

参考文献

中條利一郎・酒井英男・石田 肇編 (2011) : 考古学を科学する, 臨川書店, 292p.

- Fisher, R.A. (1953): Dispersion on a sphere, Proc. Roy. Soc. London, A, 217, 295-305.
- 福岡捷二 (2005): 洪水の水理と河道の設計法, 森北出版社, 436p.
- Hirooka, K. (1971): Archaeomagnetic study for the past 2000 years in southwest Japan, Mem. Fac. Sci., Kyoto Univ., Ser. Geol. and Mineral., 38, 167-207.
- 泉 吉紀・酒井英男 (2014): 壁面からの地中レーダ探査による遺構内部構造の研究, 情報考古学, Vol.20, 1-7.
- Izumi, Y., H. Sakai and I. Kamiishi (2015): Detection of buried snowpack in landslide sediments using ground penetrating radar, J. Natural Disaster Sci. Vol.36, 55-66.
- Kashiwaya, K., S. Ochiai, H. Sakai and T. Kawai (2001): Twelve-million-year high-resolution continental climatic records from Lake Baikal sediments, Nature, vol.410, 71-74.
- Kirschvink, J.L. (1980): The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data, Geophys. J.R. Astr. Soc., 62, 699-718.
- Moldoveanu-Constantinescu, M. and Stewart, R. (2004): 3D ground penetrating radar surveys on a frozen river lagoon. SCEG Recorder, 32, 34-36.
- Sakai, H. and K. Hirooka (1986): Archaeointensity determinations from western Japan, J. Geomag. Geoelectr., 38, 1323-1329.
- Sakai, H., Y. Banba, M. Horii, T. Itaki, N. Ahagon and E. Kikawa (2005): Polarity reversals of remanent magnetization in sedimentary core from Northwind Ridge, western Arctic Ocean. Polar Geoscience, No.18, 67-82.
- 酒井英男・中埜貴元・野村成宏・堀井雅恵・澤田豊明・飯田 肇・國香正稔 (2002): 立山カルデラ内のどじょう池の地中レーダ探査, 立山カルデラ研究紀要, 第3号, 立山カルデラ砂防博物館, 15-24.
- 酒井英男・名古屋岳秀 (2012): 富山市今市遺跡の洪水堆積物, 焼土, 道路状遺構堆積物の磁化の研究, 今市遺跡発掘調査報告書, 富山市埋蔵文化財調査報告, 富山市教育委員会, 54, 56-63.
- 酒井英男・広岡公夫・中島正志・夏原信義 (2016): 考古地磁気年代推定法, 考古学と自然科学, 71学会創立30周年記念号, 1-18.
- Tarling, D.H. (1983): Palaeomagnetism, Chapman & Hall, London, 379p.
- 富山地方気象台 (1971): 富山県気象災異誌, 日本気象協会富山支部発行, 302p.
- 富山市教育委員会 (2012): 今市遺跡発掘調査報告書, 富山市埋蔵文化財調査報告, 富山市教育委員会, 54, 250p.
- Zijderveld, J.D.A. (1967): A.C. demagnetization of rocks-analysis of results, Methods in Paleomagnetism, edited by Collinson, D.W., Creer, K.M. and Runcorn, S.K., New York, Elsevier, 254-286.

(投稿受理:平成27年9月28日
訂正稿受理:平成29年3月28日)

要 旨

地球電磁気学による河川の堆積状況の研究を富山県・神通川流域において実施した。神通川支川の井田川で船に機器を載せて地中レーダの調査を行った結果、河床面および数 m 深部までの堆積状況が把握できた。調査範囲で掘削された堆積物には調査結果と調和する構造が認められ、レーダ探査が河床浅部の堆積状況の研究に有用であることが示された。

旧神通川流域の富山市・今市遺跡で発見された洪水堆積物の残留磁化を研究した。安定な磁化と地磁気変化との対比により、堆積物の年代は1900-1950年と推定された。その後の調査で、対応する地層より明治から大正時代と思われるガラス破片が見つかり、推定年代と良く整合した。旧神通川では、記録の残る水害として大正3年(1914年)の氾濫が知られており、今市遺跡の洪水堆積物もこの時に形成されたものと考えられる。地磁気年代推定法は過去2000年間の対象に適用でき、過去の洪水や河川に関連する堆積物の年代研究において活用が期待される。