

立山カルデラ内で掘削されたボーリングコアの磁化研究による深層崩壊堆積物の検討

酒井英男¹⁾、境悠希^{1)*}、竜田尚希¹⁾、丹保俊哉²⁾、杉本利英³⁾

¹⁾富山大学 ²⁾立山カルデラ砂防博物館 ³⁾株式会社ニュージェック *現在、株式会社村尾地研

1. はじめに

常願寺川源流部の弥陀ヶ原に隣接する立山カルデラの内部には多くの崩壊堆積物が存在し、その分布や量の把握は砂防計画でも重要であるが、従来、調査は少ない。本稿ではカルデラ内で掘削されたボーリングコアについて、磁化による研究を実施した。そして得られた結果から土質区分との対比と深層崩壊堆積物の検討を行なった。

1.1. 岩石や堆積物の磁性

岩石や堆積物に一般に数%含まれる鉄の酸化鉱物(磁鉄鉱や赤鉄鉱等)は、強磁性鉱物と称され、磁石になる性質がある。岩石・堆積物の生成時、強磁性鉱物の微弱な磁石は地磁気方向を向いて固定される。その集合として岩石や堆積物は残留磁化(磁化)を獲得する。磁化は、数万年後も安定に残り、地磁気の過去の記録として利用できる。

地磁気とその記録である磁化は、図1の様に、方向を示す偏角・伏角と地磁気強度(磁化強度)の3成分で表わされる。地磁気は時間変化しているが、長期間の平均では、地磁気の水平面での方向(磁北)は地理的北(真北)とほぼ一致する。また伏角は、その場所の(地磁気)緯度の関数として対応する。この様に地磁気を記録した岩石・堆積物の磁化は、過去の北方向と伏角(緯度)の情報として利用できる。

この特徴により、ある地域一帯の岩石・堆積物の磁化方向が磁北と大きくずれていると、その地域が動いた証拠となる。実際、大陸移動やプレートテクトニクスが磁化の研究で証明されている。日本列島も、琵琶湖付近で逆(◁)の字に西南日本・東北日本が屈曲している様に見えるが、岩石の磁化研究から、確かに日本列島の折れ曲がり1500-1600万年前頃にあったことが証明された。

地磁気は歴史時代にも変化している(中條他、2011; 酒井他、1986、2016; 酒井、2019)。また数十万年前まで遡ると、チバニアンでも話題となった

地磁気南北極の逆転現象もある(Sakai *et al.*, 1998, 2000等)。

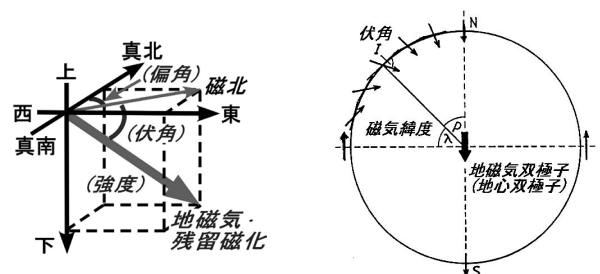
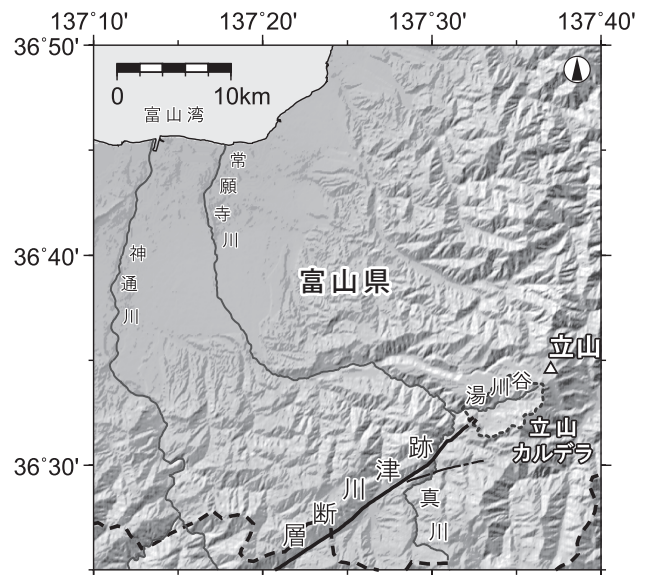


図1: 立山カルデラ、地磁気・磁化の諸要素、伏角と磁気緯度

2. 立山カルデラについて

立山カルデラは、常願寺川の支流湯川谷流域相当の、弥陀ヶ原の隣接地域に位置する東西約6.5km、南北約4.5kmの窪地の通称である(図2)。その形成は、約22万年前に活動し始めた立山火山の火山谷が、侵食作用により伸び、徐々に拡大して形成されたとの侵食カルデラ説が現在受け入れられている。多くの崩壊地形があり、度重なる崩壊により土砂を蓄積し、土石流も頻繁に発生している。

1858年4月9日には、跡津川断層を震源とした飛越地震によりカルデラ南部の大鷲山・小鷲山が崩れ、鷲崩れと呼ばれる大崩壊を生じた。この時の崩壊土

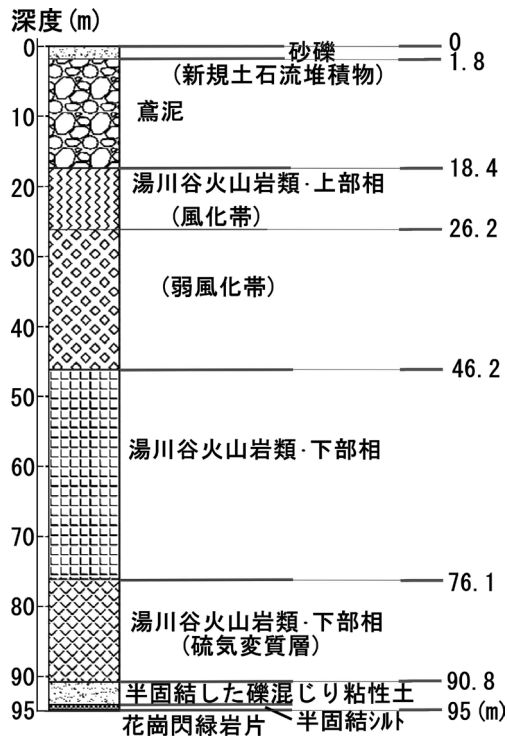


図3. コアの柱状図。野崎・菊川(2012)より引用・加筆。

が悪い箇所は省き、1m毎に細分された各コアを5cm間隔にて測定した。

4.2. 残留磁化

磁化研究は、コアから下記の方法で採取した253個の試料について行った。研究には超伝導磁力計(2G社、760R、図4)を使用した。ここでは、消磁実験を行う前の自然残留磁化(NRM:natural remanent magnetization)の研究結果を報告する。

<個別試料の採取：図4>

細分された小コアからの試料の採取・整形は、部位の固さにより以下の3種類の方法で行った。

- (1)ある程度固い礫の部位では、ダイヤモンドドリルを用いて円柱状(直径約24mm)の試料をくり抜き、岩石カッタにて長さ20mmの円柱試料に成形した。
- (2)あまり固くない部位は、ドリルや岩石カッタを用いると崩れるので、工作用カッタやグラインダーで削り、ポリカーボネート製ケース(2cm立方)に入れて、周りを耐熱ボンドで補強し作成した。
- (3)更に脆い半固結状態の砂礫や変質・自破碎を受けた岩石では、上述のケースを直接埋め込んで試料採取を行った。

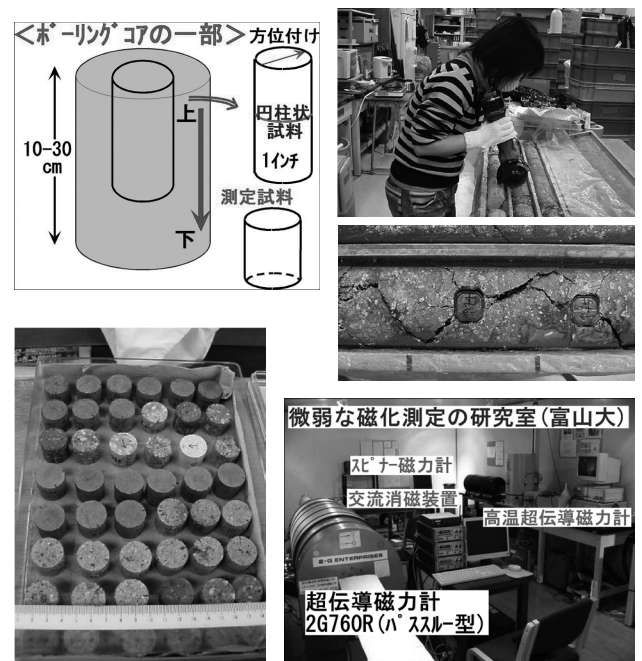


図4. 磁化の研究試料作成と磁化測定の装置(右下)。

5. 測定結果

5.1. 帯磁率

図5には帯磁率の深度変化を示している(右図は指数表示)。柱状図の土質区分(元は図3)には、磁化研究との対比のため、明治コンサルタントの調査による安山岩類の部位(I)と強変質安山岩類の部位(II)も加えている。

<帯磁率の深度変化>

- (1)深度1.8-18.4mの鳶泥の領域では、帯磁率は3.4-6.8m(部位I)で大きく低下した。岩相は安山岩質であるが、鳶泥の一部として運ばれたと推測される。低い帯磁率は変質のためと考えられる。
- (2)深度18.4-46.2mの湯川谷火山岩類上部相の領域では、26m付近で帯磁率は変わる。上位の風化帯(18.4-26.2m)は下位の弱風化帯(26.2-46.2m)より低い帯磁率となっている。
- (3)深度46.2-90.8m(湯川谷火山岩類下部相)では、帯磁率は46.2mを境に大きく下がり、上部相との違いは帯磁率で明確に判別できた。深度46.2-56m(部位II)は岩質区分はされていないが、帯磁率は上・下位より明瞭に弱い。明治コンサルタントの柱状図では強変質安山岩類とされており、部位Iと同様に強変質の影響が帯磁率に現れたと考えられる。
- (4)深度76.1-90.8mも岩質は、同じ湯川谷火山岩類下部相であるが、硫気変質層とされる。帯磁率は、

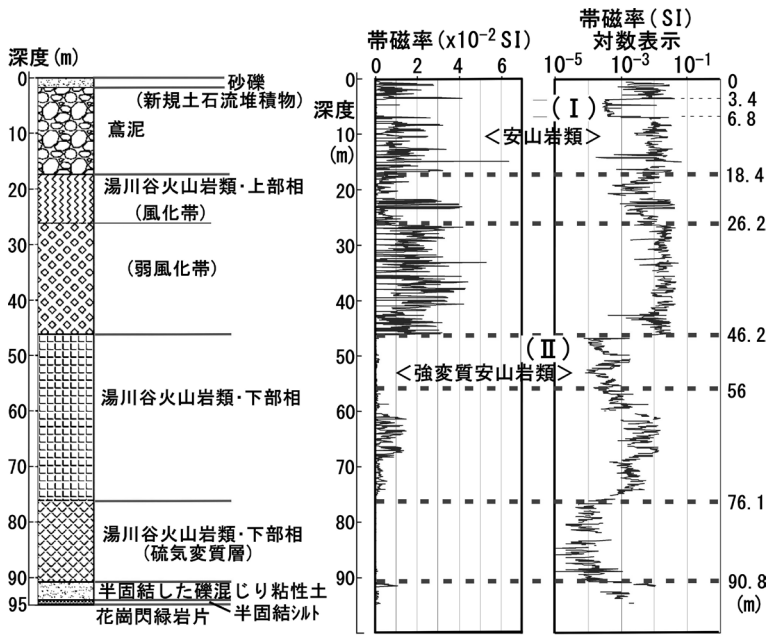


図5. コアの土質区分と帯磁率の変化

上位層の値より顕著に低く、変質の影響を示している。

(5) 深度90.8mでの帯磁率の変化は、その下位で岩質が礫混じり粘性土に変わることと調和する。

5. 残留磁化

コアの磁化偏角(水平面での磁北からのずれ)は、

コアが掘削時に回転して不明になるので使わず、伏角と磁化強度について検討した。

図6に伏角と磁化強度(対数)の変化を示している。伏角については、調査地の地磁気の伏角は約51°であり、この値からの大きなずれは、その領域が傾斜・変形したことを示している。磁化強度の変化は、試料中の磁性鉱物の種類・量の違いを主に表しているが、変質によっても変わる。

図6より、伏角と磁化強度の深度変化について、以下の傾向が読み取れる。

(1) 深度1.8-18.4m、鳶泥の領域

磁化強度は、 10^{-3} - 10^{-1} ($A \cdot m^2/kg$)の範囲にあり変動している。

伏角は、帯磁率(図5)も集中した部位 I の安山岩類の範囲はまとまるが、全体としてばらついている。山体崩壊後の移動での崩れの攪乱を受けたためと考えられる。負の伏角が多いのは、この領域が移動の際に逆さまになったことを示している。

(2) 深度18.4-46.2m、湯川谷火山岩類上部相

① 18.4-26.2m(風化帯)では、磁化強度はほぼ一定であり、また伏角は-30°付近が多い。この領域

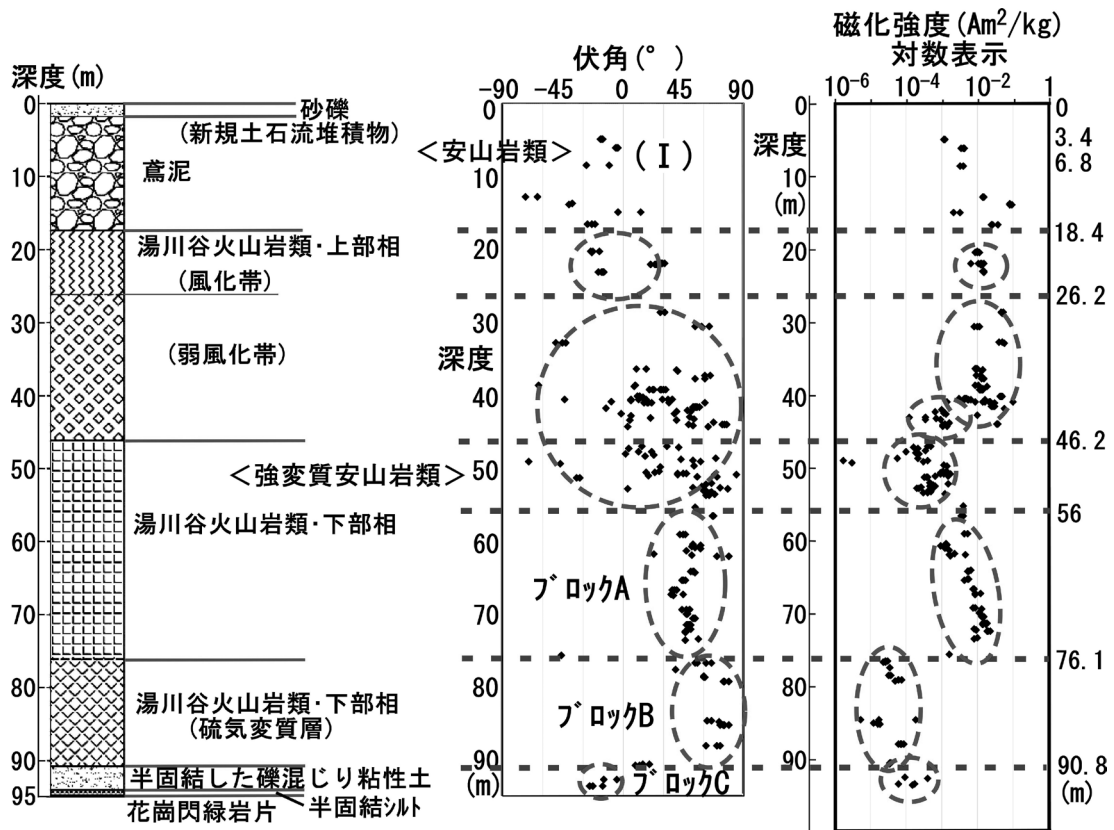


図6. コアの伏角と磁化強度の変化

は、あまり乱れず到達したと考えられる。

②26.2-46.2m(弱風化帯)では、磁化強度は、上位の風化帯とほぼ同じ値で続くが、40-46.2m付近で弱くなっている。理由として、下層の帯磁率が弱い強変質安山岩類と混ざった可能性もある。伏角はばらつくが、風化帯(18.4-26.2m)に比べ正の伏角が優勢である。この違いは、風化帯と弱風化帯の領域は異なるブロックとして移動したことを示唆している。

(3)深度46.2-76.1m、湯川谷火山岩類下部相

①46.2-56mの領域は、明治コンサルタントの柱状図では強変質安山岩類と区別されていた。磁化強度はまとまっているが上・下位に比べて弱い。帯磁率も弱く、この領域は上下位と違うブロックとみなせる。磁化強度・帯磁率が弱いのは強変質の影響であり、変質は移動前の場所で起きたと考えられる(一旦、現在地より高い地域に定置してそこで変質し、再移動してきた可能性もある)。伏角のばらつきもその影響と考えられる。

②56-76.1mの領域の磁化強度は、上・下位に比べて強い(変質を受けていないと考えられる)。伏角は、図中の楕円で囲む様に、40-60°に集中した(ブロックAとする)。

(4)深度76.1-90.8m、湯川谷火山岩類下部相磁化強度は非常に弱いが、帯磁率(図5)もこの領域は弱く、硫気変質の強い影響を示している。伏角は50-70°に集まり、内部変形があまりなく移動してきたと考えられる(ブロックB)。

(6)深度90.8-95m(94m)、半固結した礫混じり粘性土磁化強度は、上位(76.1-90.8m)に比べて若干強い。伏角は-30-0°に集まった(ブロックC)。

以上の様に、磁化強度(図6)と帯磁率(図5)の変

化は概ね土質区分と対応した。また同じ岩質でも、変質(硫気や熱水)の影響を受けた範囲も帯磁率で検出できると示された。

伏角については、残留磁化には、岩石形成時の磁化に二次成分が加わった場合もあり、信頼性を高めるには二次成分を除く消磁が必要となる。幾つかの試料で交流消磁をした結果では、磁化方向を大きく変えるほどの二次磁化はなかったので、本稿の磁化方向の解釈は妥当と考えられる。

6. 山体崩壊時のブロックとしての移動

野崎・菊川(2012)は、コアの深度18.4m以深の湯川谷火山岩類について、18.4-76.1mまでは一連の領域として地すべりの様に移動したと考え、その下位90.8m(94m)までの領域も、同じ一連の地すべり崩土の可能性があると指摘している。そして地すべり発生は、3万年前頃で国見泥の時代に相当すると示している。

本研究の残留磁化はベクトルであり、一連の堆積層での磁化伏角の分散状況は、堆積層(岩体)の分類とその移動を検討できる有効な手段となる。立山カルデラのコアについて、伏角から崩壊物の移動と堆積を検討した。

図6の破線丸で囲んだ、帯磁率と磁化強度の変化が土質区分とも良く対応し、各領域では、伏角の違いも認められた。例えば、図6の56.1m以深で示したブロックA、B、Cの伏角は、それぞれ集中しており、内部擾乱が少なく移動してきたとわかる。また各ブロックの集中する伏角値はずれている。崩壊移動前の元の場所では、全領域の磁化は地磁気のもとで同じ方向に獲得された筈であり、伏角のずれは、異なるブロックとしての移動(図7の滑り)を示している。つまり、深層崩壊でのブロック移動の証明となる。

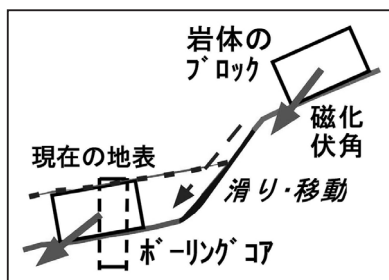


図7. 岩体の移動と磁化(伏角)

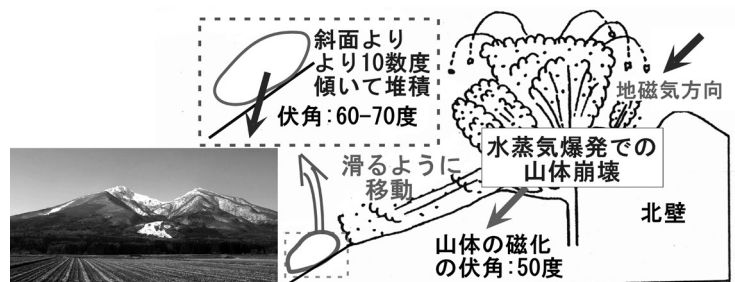


図8. 磐梯山1878年噴火での山体崩壊による岩層のブロック移動と磁化

立山カルデラのコアで認められた異なる伏角で集中する各領域の堆積物は、複数回の崩壊による移動と形成を示している。ただ、時間差は現段階ではわからず、あまり違わなければ一連の移動とみなせる。時間差は磁化ベクトルから検討できる可能性があり、試みる予定でいる。

酒井他(2003)では、磐梯火山の1888年水蒸気爆発により生じた山体崩壊地で得られたボーリングコアの磁化を研究し、厚さ80mの岩塊が火口より数kmの距離を内部擾乱も少なく滑ったことを明らかにした(図8)。大きな岩塊が、遊園地の遊具のコーヒークップの様に回転しながら滑り落ちたと考えられる。また8-9万年前の磐梯山・山体崩壊で発生した翁島崩れでは、岩屑ブロック(幅80m、高さ20m)が内部の乱れも少なく5km下り、流山を形成したことも判明した。

上記の磐梯山コアの研究結果は、深層崩壊機構の研究に於いても重要になっている。起源は噴火ではないが、同様なブロック移動が立山カルデラ深部の崩壊堆積物でも起きたと考えられる。

また、立山カルデラの数10m深部に分布する数回のブロック滑りで運ばれた崩壊堆積物は、岩質は湯川谷火山岩類である。同火山岩類は掘削点の東・北方向に広く分布しており、そこが移動源の場合には掘削点まで500m程から数kmの距離を移動したことになる。

以上の様に、ボーリングコアの磁化研究は土質区分の調査を補完し、また深層崩壊のブロック移動を検討できる。砂防の事業計画にも役立つ調査法になると考える。

7. まとめ

立山カルデラ内で崩壊堆積物を掘削した95m長のボーリングコアの磁化研究を行った。堆積物の帯磁率と磁化強度は柱状図の土質区分と調和し、各領域で明確な違いを示した。帯磁率測定は効率が良く、土質調査を補完する有効な方法になる。また今回示さなかった他の磁化パラメータも併せると、崩壊堆積物の変質も調査可能であり、滑り面の研究にも利用できる(杉本他、2013;杉本・酒井、2013)。

コアの、鳶泥より古い18.4m以深の崩壊堆積物に

は、伏角の集中から深層崩壊による数回のブロック移動の領域があると示された。今後、消磁されたデータを用いてより詳細な検討を行う予定でいる。

深層崩壊の有無や、崩壊時期の研究は重要であり、更に進めることが望まれる。その際には、野崎氏が長年行ってこられた現地調査が重要であり、ボーリング調査も併せる研究の実施が望まれる。またコアの研究では、磁化研究と共に本紀要の前章で落合氏が示しておられる放射性核種分析も有用と考えられる。

ただボーリングコアの調査はスポット研究であり、成果を面的に広げるために非破壊の探査の併用も望まれる。電磁気探査(酒井他、2003、2008、2017等)は、立山カルデラでの有効性を確かめており、活用が期待される。

謝辞

本研究は、国土交通省北陸地方整備局立山カルデラ砂防事務所の工藤裕之係長・吉村明課長(2011年当時)はじめ、関係の皆様のご好意によりボーリングコアを利用して実施できた。野崎保氏には、コアの土質について多くのご教示を頂いた。また掘削を行われた明治コンサルタント株式会社から貴重な資料や情報を頂いた。以上の方々に、心より感謝申し上げます。

研究の一部は、JSPS科研費JP20K04639の助成を受けて行われた。

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.
- 原山智、高橋浩、中野俊、荻谷愛彦、駒澤正夫(2000)：立山地域の地質、地域地質研究報告(5万分の1地質図幅)、地質調査所、218p.
- 北陸地方整備局(2007)：砂防事業の再評価説明資料(常願寺川水系直轄砂防事業)、27p.
- 町田洋(1962)：荒廃河川における侵食過程-常願寺川の場合-、地理学評論、157-174.
- 野崎保、米谷正広、菊川茂(2009)：立山カルデラと巨大崩壊の成因に関する問題点、日本応用地質学会研究発表会 講演集、11-12.
- 野崎保、菊川茂(2012)：鳶泥と国見泥-立山カルデラの形成に関わる深層崩壊とそのメカニズム、立山カルデラ研究紀要第13号、1-16.

- Sakai, H. and K. Hirooka (1986) : Archaeointensity determinations from western Japan, J. Geomag. Geoelectr., 38, 1323-1329.
- Sakai, H., E. Kikawa, T. Ishihara, H. Kobayashi, K. Komori, A. Sunagawa (1998) : Paleomagnetic study on marine sediments from Antarctic Sea, Polar Geosci., vol.11, 222-238.
- Sakai, H., S. Nomura, M. Horii, K. Kashiwaya, A. Tanaka, T. Kawai, V. Kravchinsky, J. Peck and J. King (2000) : Paleomagnetic and rockmagnetic studies on Lake Baikal sediments, in "Lake Baikal: A mirror in time and space for understanding global change processes", Elsevier Science, Amsterdam, 35-52.
- 酒井英男、澤田豊明、飯田肇(2000) : 立山カルデラの電磁気探査、立山カルデラ研究紀要、第1号、9-16.
- 酒井英男、渡辺勝也、井口隆(2003) : 磐梯火山のボーリングコアを用いた岩屑なだれ堆積物の岩石磁気学的研究、防災科学技術研究所研究報告 第64号、19-31.
- 酒井英男、丹保俊哉、飯田肇、糸井理樹、王生透、澤田豊明(2008) : 電磁気探査による立山カルデラの地下構造の研究-鳶泥と跡津川断層の東端部を探る-、立山カルデラ研究紀要第9号、11-15.
- 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、vol.71、1-18. (学会創立30周年記念号)
- 酒井英男、泉吉紀、手計太一、福岡捷二(2017) : 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、自然災害科学36-2号、143-152.
- 酒井英男(2019) : 地磁気・磁化による調査、『文化情報学事典』、勉誠出版、45-53.
- 杉本利英、野崎保、酒井英男(2013) : 利賀地溝帯縁部の地すべり地域における空中磁気探査の適用性、砂防学会誌、66巻、第1号、23-29.
- 杉本利英、酒井英男(2013) : 花崗岩類熱水変質地帯でのトンネルの地質調査における磁気調査の有効性、土木学会論文集F1(トンネル工学)特集号、vol.69、No.3、I1-9.

要旨

常願寺川源流部の立山カルデラで掘削されたボーリングコア(95m長)の磁化研究を行った。立山カルデラには多くの崩壊堆積物が存在すると推測されており、安政飛越地震(1858)で発生した鳶泥と呼ばれる崩壊物が常願寺川下流域に甚大な土砂災害を起こした。鳶泥と共に下位に推測される崩壊堆積物の状況の把握は砂防事業でも重要である。本研究では、同ボーリングコアの磁化(帯磁率、残留磁化)を調査し、柱状図の土質区分と総合して以下の解釈を得た。

鳶泥(コア上部18m程)の下位に複数回の崩壊で運ばれた堆積物(構造)がある。その中には磁化の伏角が集中する層があり、これはブロックとして内部があまり乱れず地滑りの様に移動した、深層崩壊の領域とわかった。ボーリング調査と磁化研究は、立山カルデラで起きた深層崩壊の証明、崩壊堆積物の分布や移動の検討に有用であり、今後の活用が望まれる。