

噴砂や断層近傍の土壌の磁化特性の研究

— ペットボトルによる液状化の実験と古地震の年代推定 —

酒井 英男¹⁾、正和紗央里¹⁾、岸田 徹¹⁾、伊藤 孝¹⁾、飯田 肇²⁾

1. はじめに

地震時に発生する液状化現象は、大きな被害を及ぼすことが知られ、地震の調査研究において重要視されている。最近、考古学の発掘調査において、過去の地震災害を示す噴砂の検出が各地で報告されている(寒川, 1999等)。歴史時代・考古学時代にも、当時の人の生活場所や住居が液状化やそれに伴う噴砂により被害を被ったことが推測され、遺跡における噴砂の研究は新たな課題となっている。しかし、遺跡に影響した地震災害の調査は、従来は主に発掘現場で目視により行われており、噴砂との判定が容易でなく報告されない場合もあった。

我々は、遺跡に残った地震跡としての液状化の痕跡や噴砂を、残留磁化や磁化特性を用いて研究する手法を検討している。更に地中レーダ等の探査と、年代学・史学、その他の研究を併せる総合的研究への発展を旨とし研究を進めている。本稿では、残留磁化と磁化特性による地震噴砂の研究について報告する。

2. 残留磁化による断層の年代推定の例

活断層近傍での磁化調査の例として、富山県・岐阜県の県境付近を東西に走る跡津川断層の露頭で行った研究を紹介する(酒井・広岡, 1983)。跡津川断層西部の岐阜県宮川村において、京都大学防災研究所などによるトレンチ調査が行われ、見事な断層露頭が現れた。図1には、調査地点と断層露頭西側面のスケッチを示している。また、同露頭写真に示す様に、下位層の花崗岩の層が逆断層のセンスで上がり、それに引きずられて、断層面で接する河床堆積物の変形が認められた。

図2の左上には、露頭において河床堆積物から磁化調査用の試料を採集した地点を示している。図中

の番号1から4の領域において、1インチ角のプラスチック製ケースを堆積物に打ち込み堆積物試料を採集した。番号を付した長方形の領域から、それぞれ5-6個の試料を採集している。右側には、これらの試料について、交流消磁実験を行って得た信頼できる残留磁化の方向を、シュミット等積投影図に示している。領域2と3の試料では、磁化方向は大円に沿ってずれる傾向がみられ、これはこの領域が断層運動に伴う変形を被ったことを示している。領域4の試料群では、磁化方向は、まとまってはいるものの地磁気の方向(現在の調査地での地磁気伏角は約50度)からは大きく外れている。これは、同領域がブロックとして変形を被ったことを示すと考えられる。以上の様に、断層から約1mまでの距離に位置する領域2,3,4の試料は、磁化方向が本来の堆積時の方向からずれており、これらの領域は堆積時に地磁気方向に残留磁化を獲得した後、地震の際の断層面のずれに伴い変形したと推定される。露頭においてもこの領域の地層変形が読みとれ、変形のセンスと磁化方向のずれも調和的であった。

これに対して、領域1は、断層面から50cm程度と近く、断層面のずれに伴ってより大きな変形を受けたと推定されたが、この領域の試料の磁化方向は集中しており、また地磁気方向からもあまりずれていない。領域1の試料群の磁化方向について平均を求めて、図2の下の図に示す過去の地磁気方向の変動(Hirooka, 1971)と対比してみた。その結果、磁化方向はAD1850-1900年頃の地磁気方向にあたるとうわかった。もし、領域1の試料の磁化が地震時に獲得されたとすると、跡津川断層が活動した過去の地震のうちで最近起きた、安政の地震(AD1858年)との対応が見つかる。トレンチにおいて、安政の地震の時に露頭の

1) 富山大学理学部、2) 立山カルデラ砂防博物館

断層面がずれた可能性が他の調査からも示唆されていた。

断層面の近傍の堆積物が、変形ではなくて再帯磁をしていたことについては、地震時に断層面近傍では地下水が上昇して土壌と混ざった状態で揺すられ、土壌中の磁性鉱物は、地磁気方向に再帯磁したのではないかと考えている。

同様に液状化の際に噴砂も地下から噴出して堆積する時に、含まれる磁性鉱物が地磁気方向へ再帯磁すると考えられる。実際に、幾つかの遺跡において噴砂の残留磁化から遺跡に被害を及ぼした地震の年代推定において研究成果が得られている（例えば富山市打出遺跡や小出遺跡における研究、準備中）。過去の地震の年代推定に、断層近傍の堆積物や噴砂の

残留磁化が利用できることがわかり、地震の研究における有効な手法とすべく研究をさらに進めている。

次に、噴砂が獲得する残留磁化についてモデル実験を行った結果を報告する。

3. エッキーによる液状化と磁化獲得の実験

納口（2001）は、地震時の液状化現象をペットボトル中で再現する実験方法（エッキーと名付けられている）を考え、様々な方面への応用を示している（防災科学技術研究所, 2003）。本研究では、納口の手法を参考に、地震の際に、液状化した堆積物や噴砂が地磁気方向に磁化を獲得する過程を実験により調べることにした。実験の手順と方法を以下に示す。

①1.5Lのペットボトルを用意し、中に砂300cc（常願

寺川上流で採取した砂を2μmのふるいにかけてものを入れて、空気が入らない様に口まで水を入れる。

②ペットボトルの蓋を閉めて、よく振り、木製の机の水平な場所に置く。この時に、地磁気の乱れを避けるため、金属製の机は避けており、また周囲にも磁場を乱す金属類が無い環境である様に留意する。

ペットボトルを設置する場所の磁北方向を、磁気コンパスとフラックゲート型磁力計にて求めて、磁北方向に印をつける。そして、その場所での磁場の磁北成分と鉛直成分の大きさをフラックスゲート磁力計で測定する。

③上記のペットボトルは、丸1日間置くと十分に砂が沈殿した状態になっている。そこで、ペットボトル

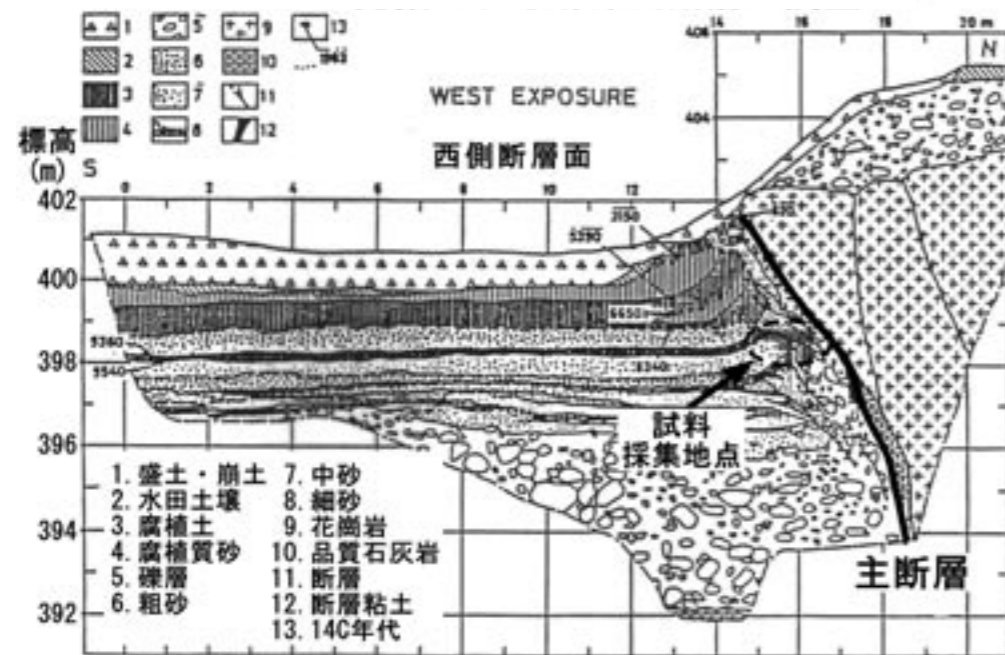
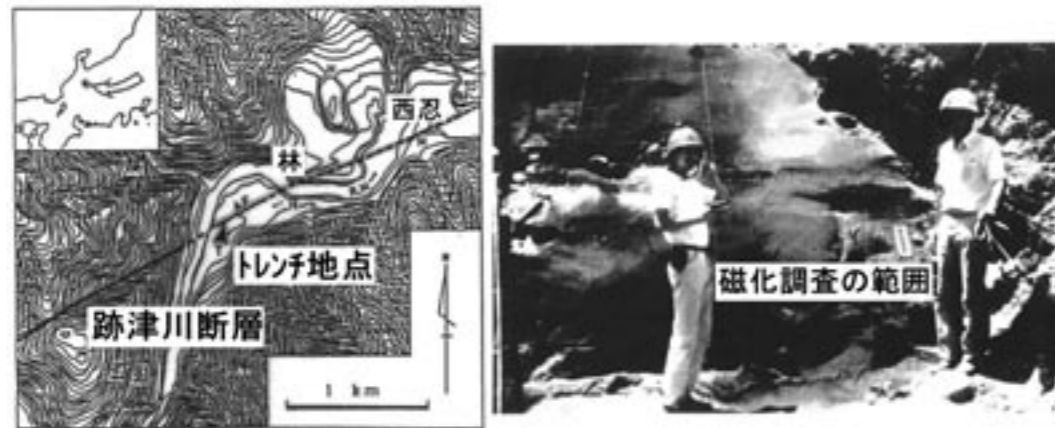


図1 調査地点と断層露頭西側面のスケッチ（上）、磁化調査用試料採取地点（下）。

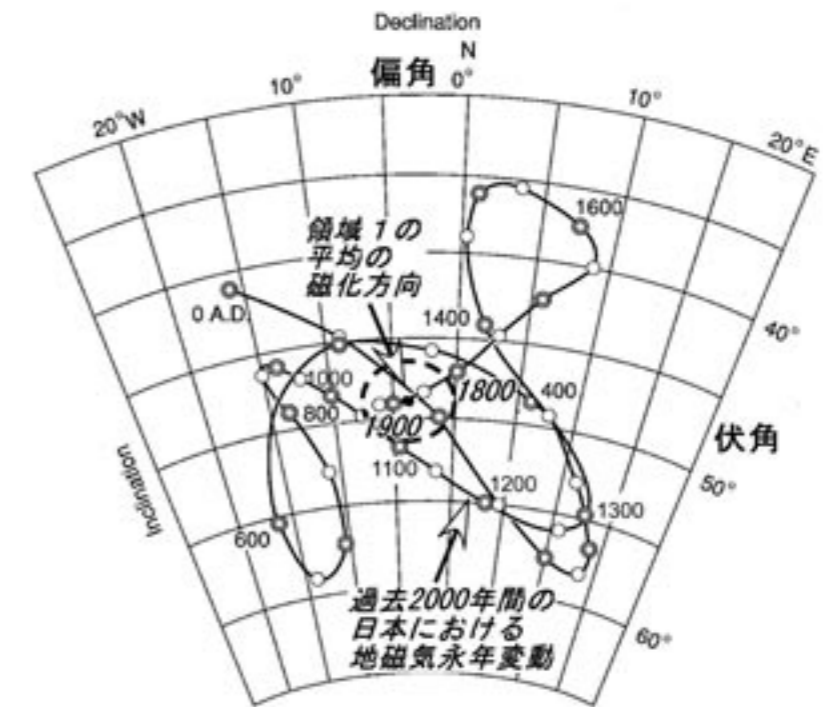
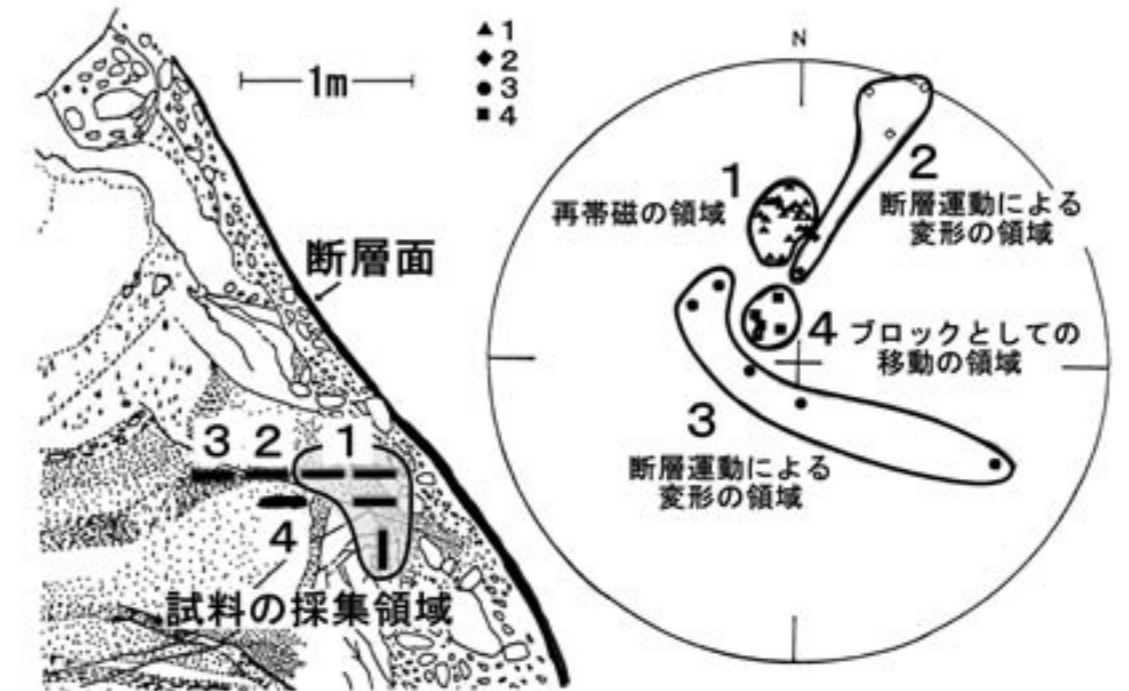


図2 上の図は露頭スケッチと試料の採取範囲（番号1から4の長方形の領域）を示し、右に交流消磁後の信頼できる残留磁化の方向をシュミット等積投影図に示した。下の図では領域1の平均磁化方向を日本における過去2000年間の地磁気変動（Hirooka, 1971）と対比している。

を指で四方から強く弾く。これが、地震を起こす現象の模倣実験である。沈殿していた堆積物は内部に水を含んでいるが、振動を受けて水が押し出され、より密な状態になる。しばらく経った後で、水をゆっくりと抜く。そして、ある程度に自然乾燥してから、ペットボトルの中の土壌の堆積面より少し上部をカッターで切り、容量7ccの立方体形状の非磁性プラスチック製ケースを堆積面に押し込み、土壌試料を採取した。プラスチック製ケースには、磁北方位をマークしておいた。4個の試料を採取した。

図3には、一連の実験過程を写真で示している。

上述の実験で作成した試料について、残留磁化の測定と段階交流消磁実験、および帯磁率の研究を実施した。残留磁化の測定には、富山大学のパスルー型超伝導磁力計 (2G Enterprise社製760R) と夏原技研製SMM-85型リングコア・スピナー磁力計を使用した。また、試料の帯磁率とその異方性について、AGICO社製のKappa bridge (KLY-3S) 帯磁率計を用いて測定した。残留磁化と帯磁率の研究の詳細については、酒井ほか (2003a, 2003b, 2004, 2006) などを参照頂きたい。

4. 測定結果

4個の試料の残留磁化について交流消磁実験を行ったが、磁化方向は殆ど変わらず、安定な磁化を示した。図4の上には、各試料の残留磁化方向を示している。次に、4試料の残留磁化について、フィッシャーの統計 (Fisher, 1953) により、その平均と磁化方向の95%の信頼範囲 (a_{95}) を算出した。その結果、残留磁化の平均は、偏角 0.1° 、伏角 39.4° 、 $a_{95} = 0.5^\circ$ の方向と求まった。図3に示す実験において、ペットボトル設置点の磁場は、フラックスゲート磁力計による測定から、伏角は 39.8° (偏角は磁北に向けているのでほぼ 0°) と示された。つまり、上記試料の残留磁化方向は、偏角、伏角ともに、実験を行った場所の磁場方向と殆ど一致していた。

以上の結果、“エッキー”による液状化の実験で作成した堆積物の残留磁化は、液状化を生じた地点の磁場方向を正しく記録しており、時間が経っても保存されていることがわかった。この実験結果は、地震による振動で液状化現象が起きた際に、液状化の土壌や噴き上げられて再堆積する噴砂は、当時の地磁気方向を残留磁化として記録することを示している。

ここから図4の下には、帯磁率異方性の測定結果を示している。右側のフリンドダイアグラムで見られる

ように、帯磁率異方性の形状は層状異方性が卓越している。また、異方性の最小軸は、左図のシュミットネット投影において中心付近に集まり、つまり鉛直方向を向いている。これらの結果は、液状化の実験試料は、層状異方性を示す水中堆積物の残留磁化に似た様な獲得機構で帯磁したことを示している。ただし、土壌は振動を受けており、通常の堆積残留磁化とは異なる (より獲得の効率は高い) 磁化と考えられる。

5. 考察とまとめ

ペットボトルを利用する液状化の実験“エッキー”により作成した土壌試料は、地磁気の方に残留磁化を獲得した。この結果は、地震による振動で液状化現象が起きた際に、液状化に伴う土壌や噴砂は地震時の地磁気方向に残留磁化を獲得すること、および当時

の地磁気の記録として噴砂に長く残ることを示している。この残留磁化を用いて、古地震の年代推定が可能となる。

土壌試料の帯磁率異方性は層状異方性を示し、その最小軸は鉛直方向にあり、最大軸は水平方向に分布した。この結果も合わせて、液状化に伴う土壌や噴砂の残留磁化の獲得メカニズムを考えると、第一次近似としては、海洋底や湖底の堆積物が水中で残留磁化を獲得する機構に似ている。ただし、振動を受けており、通常の堆積残留磁化とは異なる (より磁化の獲得効率は高い) と考えられるので、この残留磁化を地震動残留磁化 (Quake remanent magnetization: QRM) と名付けたい。

噴砂は、地震の起きた時代の地磁気の方角を残留磁化 (QRM) として記録することから、考古地磁気の

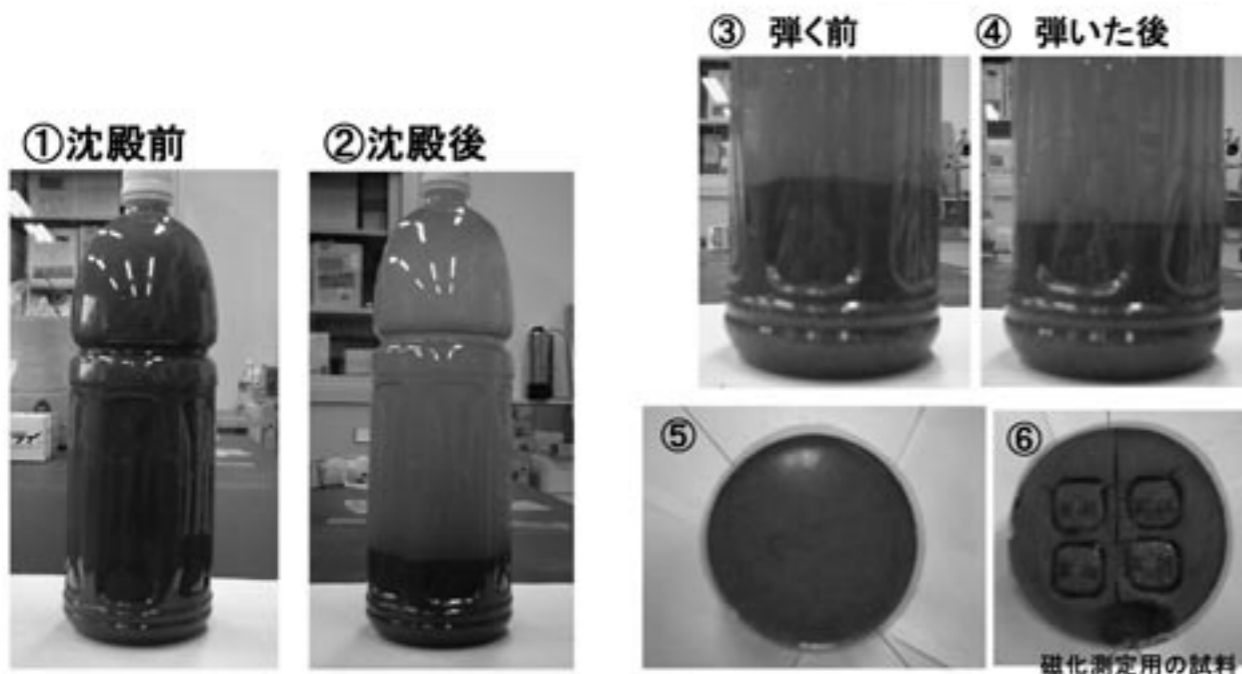


図3 液状化に伴う残留磁化の獲得実験の様子を示す。

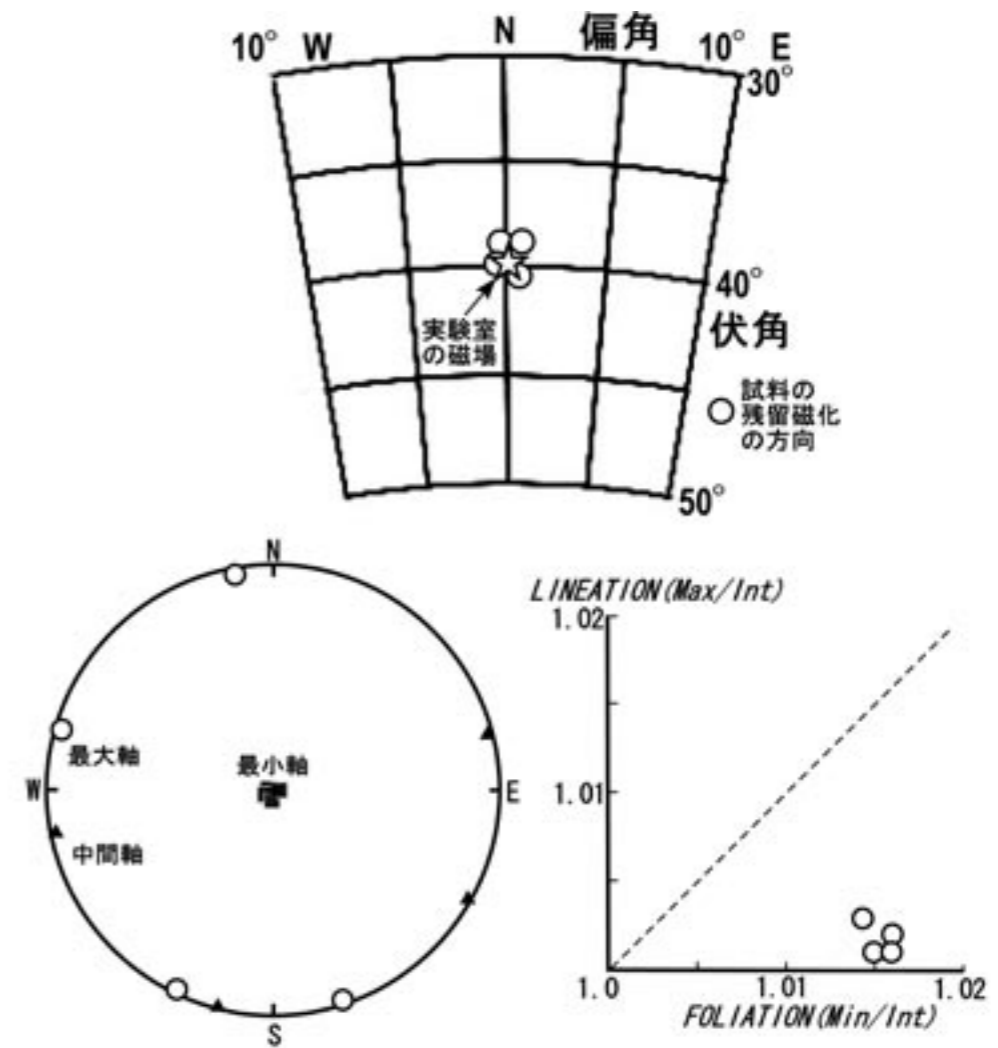


図4 上には液状化実験の試料の残留磁化の測定結果を示す。下には、同試料の帯磁率異方性について、形状をフリンドダイアグラム (右) で示し、異方性の方向をシュミットネット投影 (左) で表した。

研究による古地震の年代推定が行える。また、残留磁化や帯磁率異方性などの磁気物性により、地震で生じた地層の変形も検討できる。以上の方法は地震の研究における新たな方法として現在、様々な研究対象について試みている。特に遺跡における地震の痕跡の研究は実際の生活空間に及んだ過去の災害の研究（災害考古学）の面からも重要であり、本研究の手法が活用できると考えている。

参考文献

- 独立行政法人 防災科学技術研究所（2003）：感性でとらえる地盤液状化の科学おもちゃエッキー、pp. 18.
- Fisher, R.A. (1953) : Dispersion on a sphere, Proc. Roy. Soc. London, A217, 295–305.
- Hirooka, K. (1971) : Archaeomagnetic study for the past 2,000 years south west Japan, Mem. Fac. Sci., Kyoto Univ. ser. Geol. & Mineral., 38, 167–207.
- 納口恭明（2001）：地盤液状化実験ボトル「エッキー」、防災科学技術研究所報告、61、49–53.
- 酒井英男・広岡公夫（1983）：古地磁気・岩石磁気からみた断層運動、月刊地球、vol.7、394–398.
- Sakai, H., and Inokuchi, T., (2003a) : Rockmagnetic study on the debris avalanche deposits of Bandai Volcano -debris at 1888 eruption and Okinajima debris-, Journal of the Japan Landslide Society, vol.40, No.1, 22–31.
- 酒井英男・小山沙由紀・岸田徹・堀井雅恵・澤田豊明・飯田肇（2003b）：流路実験装置で作成した堆積物の構造を帯磁率異方性から探る、立山カルデラ研究紀要、第4号、立山カルデラ砂防博物館、15–24.
- 酒井英男・澤田豊明・畚野匡・井口隆（2004）：磁化特性を用いた火山堆積物の定置温度の推定と分類、防災科学技術研究所研究報告、第65号、163–171.
- 酒井英男・吉田直人・金井友理・岸田 徹・伊藤 孝・前川 要（2006）：青森県十三湊遺跡の焼土遺構における考古地磁気の研究『十三湊遺跡—第156次・第157次調査発掘調査報告書—』、中央大学文学部日本史学研究室・青森県五所川原市教育委員会、（印刷中）.
- 寒川 旭（1999）：地震考古学—遺跡が語る地震の歴史—、中公新書、pp.251.

【要 旨】

地震時に発生する液状化は大きな被害を及ぼす。遺跡からも噴砂が検出されており、歴史・考古時代にも人々の生活に液状化や噴砂が被害を及ぼしたと推測されている。本稿では、液状化で生じた土壌や噴砂の磁化から地震の痕跡を探る研究を報告する。ペットボトルを利用して作成した液状化の土壌は、地磁気方向と一致する残留磁化を獲得していた。この結果は、液状化の際に土壌や噴砂は地磁気を記録する残留磁化を獲得し、長く保存されることを示している。この地震動残留磁化（QRM）と地磁気変動の対比によって地震の年代推定が可能となり、また地震で生じた地層の変形も検討できる。地震研究の新たな方法として、特に遺跡における地震の痕跡の研究に今後利用を予定している。