

## 信濃川流域の堤防における地震被害の電磁気調査

—特に液状化と噴砂による被害の対策を目的として—

富山大学理工学研究部 酒井英男

### 1. はじめに

新潟県では、最近の50年間で3回の大きな地震が起きている。理科年表には、新潟県に影響した有史時代のマグニチュード6.5以上の地震として、10数回の地震が示されている。最も古いのは貞観地震(863年)であり、それ以降1500年まで記載は無く、1500年以後の地震も古いほど少ない。以上のことは、新潟県では報告されていない地震が多く残っている可能性を示唆している。

政府の地震調査研究推進本部が作成した地震動予測分布(今後30年間での被害確率等)は、各地で想定される地震被害の情報となっている。その作成には、観測以前の地震データとして古文書が利用されているが、上述の様に古い時代ほど資料は少なく、またそれによる古地震の復元は容易では無い。また、過去の地震の別の調査法である、断層近傍におけるトレンチ調査や遺跡の発掘調査では、基本となる年代推定で汎用される放射性炭素年代推定法は、噴砂に適用できない等の難点があった。

我々は、過去の地震の年代を探るために、地磁気を利用する手法の開発を進めてきた。本課題研究では、信濃川中流域と周辺の遺跡に認められた地震被害について、特に噴砂を発生させた地震の年代と液状化範囲を、考古地磁気学と電磁気探査法の手法により調査した。

### 2. 調査範囲と内容

調査は、新潟県長岡市の町軽井地区、大河津可動堰周辺と五千石遺跡で行った(図1)。

<調査場所>

- ①大河津可動堰の工事地区
- ②近傍の五千石遺跡  
(長岡市・燕市教育委員会の発掘調査地域)
- ③町軽井地区の被災堤防と周辺地域

調査内容として、噴砂の地下分布の非破壊探査を、大河津可動堰工事地区と町軽井地区の河川敷で行った。また、地震で生じた噴砂や地層の変形について、年代と変形状況の調査を、町軽井河川敷と堤防開削地及び、五千石遺跡において実施した。

図1. 調査地域



五千石遺跡では、数年前から考古学的な調査が行われており、地震に伴って生じたと思われる噴砂や地層のずれが複数見つかっている。

次に、調査方法を簡単に説明する。

#### (1) 堆積物等の磁気物性の調査

堆積物や岩石に含まれている磁性鉱物は、微弱ながら磁石(残留磁化)を担う性質があり、それらの物質が形成された時の地磁気(地球磁場)の方向を、残留磁化として記録できる。そして、残留磁化は、一旦獲得されると安定で、数千年後でも残っている。また地磁気は、一定ではなく変化している。日本では、多くの試料の残留磁気の研究から、図2(B)の様に、過去2千年間に

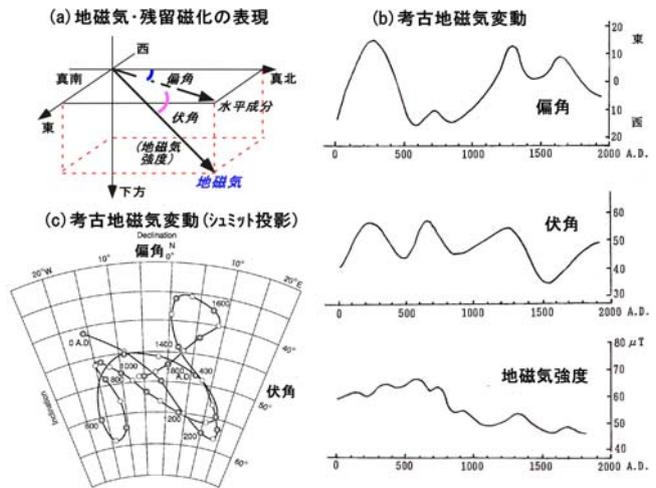
おける地磁気変動の様子が求められている(Hirooka;1971, Sakai & Hirooka;1985).

この地磁気変動を利用すると、年代不明の堆積物等について残留磁化(地磁気の化石)を研究して、その方向を地磁気変動と対比することにより、堆積物等の年代が推定できる。

この年代の研究方法を用いて、地震の際に出現した噴砂や堆積層、及び遺跡の焼土の年代を研究した。

図 2.

- (a) 地磁気の偏角, 伏角と地磁気強度,
- (b) 地磁気の過去 2000 年間の変動
- (c) 偏角・伏角の変動のシュミットネット投影図



## (2) 地中レーダ探査

もう一つの研究方法は、地下の状況を掘らずに非破壊で調べる探査の方法である。今回は、電磁気探査の一つである、地中レーダ探査法を用いて地震の被害地域の地下の調査を行った。以下では、この二つの研究方法で調査した結果を順に示していく。

## 3. 町軽井地区の堤防周囲の噴砂の調査

信濃川中流域の町軽井地区では、中越沖地震により発生した噴砂が、一部の地域で現在も確認できる。この町軽井の堤防近傍の河川敷(図 3 左上)において、工事により、表層が数 10cm はぎ取られた後の平坦部を対象に、地中レーダ法による非破壊探査を行った。

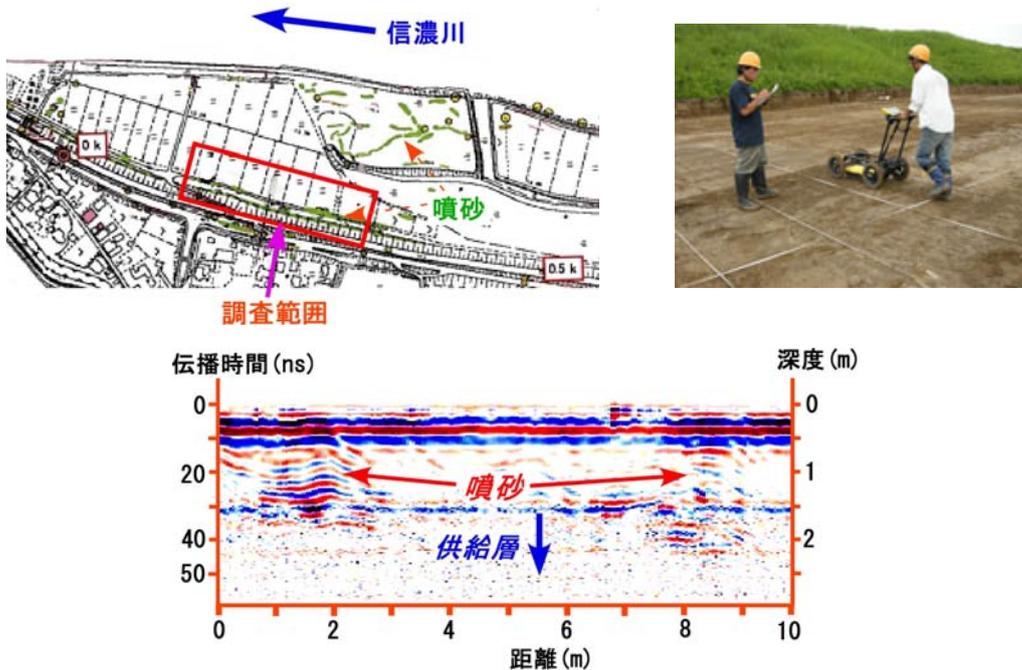


図 3. 地中レーダ探査の範囲(左上), 探査状況(右上), 探査結果の断面図(下).

図3の下に、1本の測線の探査で求められた地中の鉛直断面図の例を示しており、噴砂が地下を上昇している様子が読みとれる。そして、噴砂を供給した層は、表層から約1.5mより下部に位置するとわかる。

また右の図4には、複数測線における探査結果を併せて解析した深度1mと2mの水平断面図を示している。

深度1mまで剥いだ平面には、地表にも現れた噴砂が、下へ続いている様子がわかる。また地表には現れず途中で止まった噴砂もある。

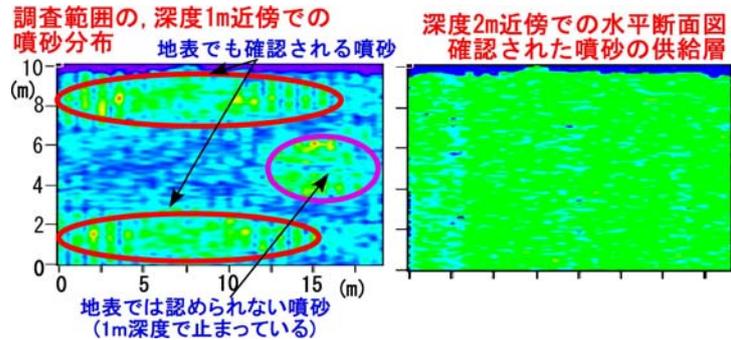


図4. 噴砂の地中分布

右の図は、深度2mまで剥いだ面を示すが、全面、噴砂と同じ堆積層であり、深度1.5mより深部が、噴砂の供給層であったことを裏付けている。以上の様に、探査により信濃川流域での”噴砂の地下分布”が明確に読みとれた。

### <噴砂の磁気物性の研究>

地中レーダ探査により噴砂を確認できた2つの地域で、表層から数10cm深部の地域において、噴砂を、方位を付けた定方位試料としてプラスチックケースにて複数個採集し、それらの残留磁化を、超伝導磁力計で研究した。

2つの地域から得た噴砂試料の残留磁化の平均方向を、図5にシュミットネット投影図で表している。各地域の複数の噴砂試料の磁化方向は集中し、現在の地磁気方向とほぼ、一致している。

この結果は、噴砂は、最近の地震（中越沖地震の可能性が高い）の際に、当時の地磁気方向に磁化を獲得しており、その後、乱されずに保存されていることを示している。

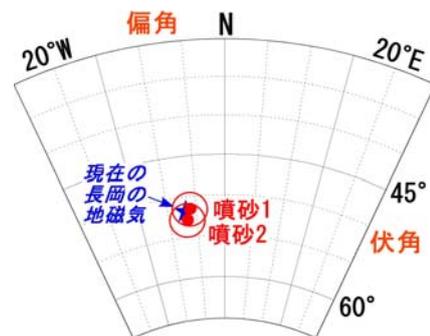


図5. 噴砂の残留磁化の方向

### 4. 信濃川中流域の大河津可動堰周辺での探査

図6左に示す、噴砂の脈が広範囲に認められる露頭の、手前の平坦面(工事による掘り下げ面)で探査を行った。噴砂脈は5m程の高さに達し、地表(露頭の頂上)近くまで噴出しており、近年(中越沖地震の可能性が考えられる)の液状化に伴って発生したと考えられている。

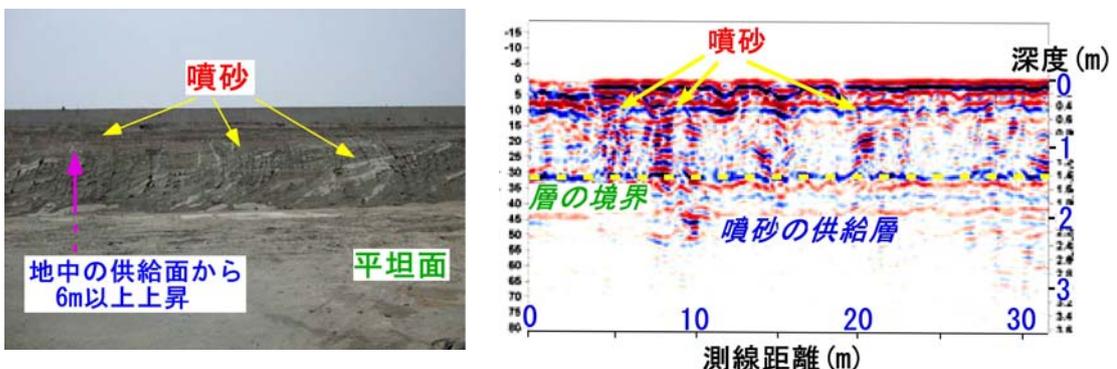


図6. 大河津可動堰の周辺における噴砂の露頭と手前の平坦地での探査結果

露頭に平行な測線で行ったレーザ探査（右図）では、深度約 1.4m を境に上下の層が判別でき、更に、噴砂が下層から上昇する様子が数カ所で認められた。左図の露頭に現れた噴砂の供給源である下層は、人工的に削られた平坦面の約 1.4m 深部に位置することより、噴砂脈には 6m 以上上昇したものもあったとわかる。

探査の前に、同地域で行われた工事事務所による簡易掘削では、平坦面より数 m 深度まで同じ砂層が続くとされ、噴砂の供給層は、掘り下げられた平坦面と推測されていた。目視では、液状化を起こした下層と上層の判別は困難であったと考えられる。噴砂の広範囲での調査に、非破壊の探査は有用であり、詳細な探査により噴砂の分布を三次元で捉えることも可能である。

同地域は、河川近傍での液状化と噴砂を研究し、それによる河川関連施設の被害を考える上でも重要であり、今後、残留磁気も含めて更に調査を行う必要がある。

### 5. 町軽井地区の堤防開削地での残留磁化の研究

新潟地震以降の地震による被害が報告されている町軽井地区の堤防で、昨年 11 月に開削工事が行われた際に、法面に現れた数カ所の噴砂から定方位試料を採取して、その残留磁化を研究した。

(1) 下流側の法面に現れた上向きに延びた噴砂の調査

図 7 の、A、B の 2 つの地点では、上方に延びた噴砂脈が認められた。

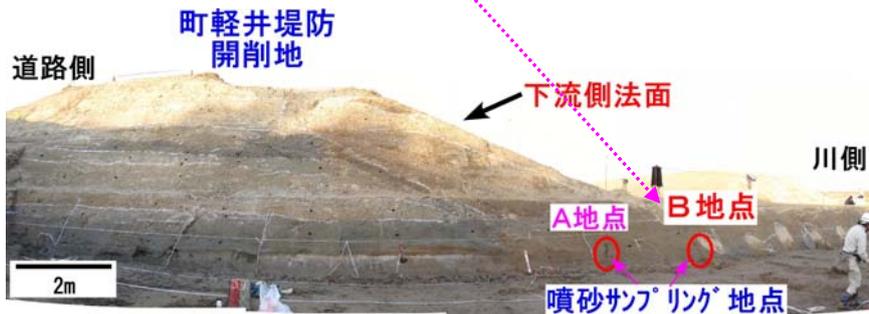


図 7. 下流側の法面の 2 カ所に現れた上向きに延びた噴砂脈

#### < B 地点における噴砂の磁化調査 >

B 地点の噴砂脈は、細いが、ほぼ真っ直ぐに上昇していた。噴砂試料の残留磁化の方向は、比較的集中しており、近年の地磁気に近い方向を示した。これは、B 地点の噴砂が、新潟地震以降の地震（中越沖地震まで）に伴って形成されたことを表している。

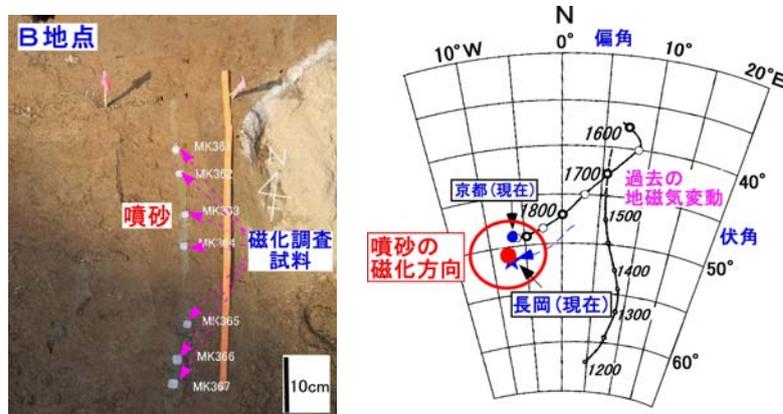


図 8. 下流側の法面 B 地点の噴砂と残留磁化方向

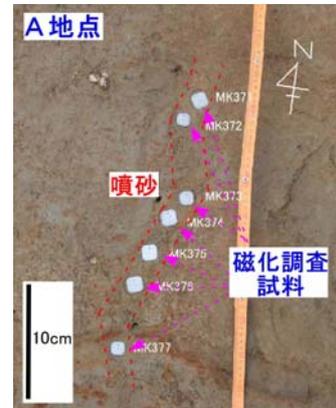
地磁気変動との対比と周囲の状況から、最も可能性が高い地震は、3章で示した河川敷に現れていた噴砂と同様に、中越沖地震と考えられる。

### < A地点における噴砂の磁化調査 >

A地点の噴砂から得た複数個の試料の示す残留磁化の方向は、あまり集中しておらず、図8の地磁気変動との比較でも年代推定は難しかった。この噴砂は、曲がって周囲の地層へ入っている。

磁気物性(帯磁率異方性)から、形成時の状況を検討すると、噴砂が形成途中で、固まりながら変形した可能性も示唆され、そのために、残留磁化方向の誤差も大きくなったと考えられる。

図9. 下流側の法面A地点の噴砂



### (2) 上流側の法面に現れた上向きに延びた噴砂の調査

次に、図10の河川の上流側の法面に現れた、地層へほぼ水平に入り込んだ、ワズ状の噴砂について調査した。



図10. 上流側の法面と調査した噴砂試料の採集場所

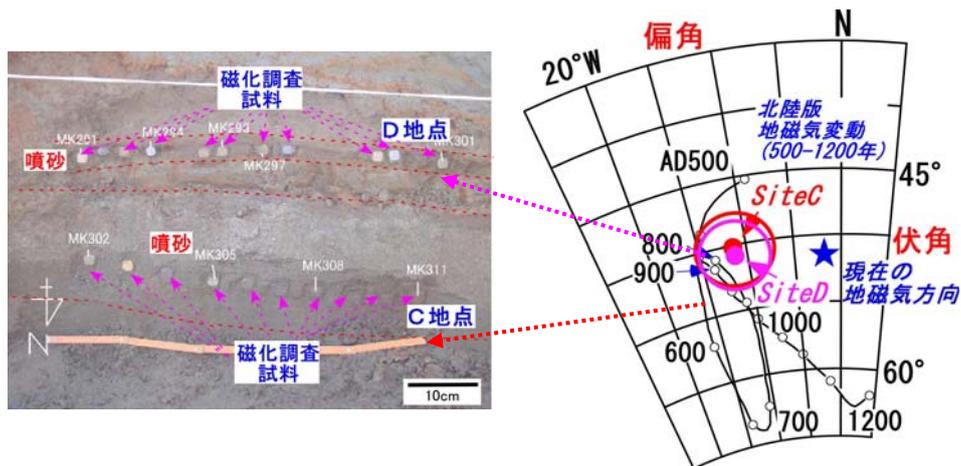


図11. 上流側法面のワズ状噴砂の残留磁化方向と地磁気変動

図11の左に示す2地点(C, D地点)の、地層にワズ状に入った噴砂から、複数個の定方位試料を採取した。噴砂試料の残留磁化は、右のシュミット網図に示される様に、それぞれ集中した方向を示し、また2地点の平均の磁化方向はほぼ一致しており、信頼できるデータとなっている。

それらの磁化方向は、最近の地磁気とは異なった方向にあり、過去の地磁気変動との対比では、AD. 800-900年頃の年代が推定できる。つまり、上流側法面のレンズ状噴砂は、9世紀頃に形成されたことを示している。この年代は、理科年表等で、新潟県に起きた最も古い地震と知られている貞観地震(AD. 863年)に相当する。

堤防開削地に現れた噴砂の残留磁化の調査から、長岡市町軽井地区の堤防の基盤は、新潟地震より以前の地震の影響も受けた可能性が考えられる。ただ、同様な年代を示す研究結果が、近傍の他の地点でも複数例得られないと、貞観地震が信濃川中流域で起きたことを強くは主張できない。

## 6. 五千石遺跡の変形の調査

五千石遺跡では、地震で変形を受けた地層と周辺の焼土遺構の年代推定に成功し、その結果、古墳時代に、同遺跡を地震が影響したことが示された。調査結果は、長岡市教育委員会の考古学調査と併せて検討中であるが、従来、新潟県では未報告の古墳時代の地震が信濃川中流域を襲った可能性が高い。

## 7. まとめと考察

地震の調査研究において、過去の地震の情報は重要であり、その必要性は今後、更に高まると考えられる。本研究では、新潟県長岡市の信濃川中流域で起きた過去の地震の痕跡を対象に、電磁気学の研究手法の有用性を検討した。

### (1) 噴砂および液状化層の非破壊探査

探査により、町軽井地区の信濃川河川敷には、地下浅部に液状化し噴砂源となる(中越沖地震で噴砂を発生)堆積層が広範囲に分布するとわかった。数km離れた大河津分水地域にも、同様に中越沖地震で噴砂を生じた堆積層が地下浅部に存在すると示された。

本研究で試みた方法で、信濃川中流域において中越沖地震で現れた噴砂をkeyに噴砂源の分布を詳細に調査することは、今後の同地域における液状化被害の推定と対応を考える上で有用と考えられる。また探査結果を基に、噴砂源を各地で簡易掘削し、年代推定により、噴砂を発生した(最終)古地震の年代分布を得ることができれば、貴重な情報となる。

### (2) 噴砂の年代推定

液状化に伴う噴砂の年代を露頭で決めることは難しく、従来は地層との切合いにより年代が推定されている。噴砂は、地層を貫いておれば、それより新しいと言えるが、必ずしも、当時の最も新しい地層を貫かないことに留意を要する。特に、地震により地層間の隙間に入り込んだレンズ状の噴砂では、その年代は上位層より古くは無い。露頭観察と共に、噴砂そのものの年代研究が望まれるが、放射性炭素年代推定法は適用できないため、地磁気年代法も含めた研究方法の開発・改良をより進める必要がある。本研究では、地磁気年代法により、信濃川中流域において、9世紀の地震等の痕跡が認められた。

堤防も含めて河川の近傍に位置する地域では、地震時に想定される被害として、液状化・噴砂の影響を更に研究する必要があると考えられ、本研究で行った調査を進めることも望まれる。また、河川流域での地震を想定して、液状化・噴砂の発生の条件とメカニズムを探るための室内実験を実施することも有用と考える。

**謝辞：**調査において、国土交通省の信濃川河川工事事務所、長岡市教育委員会、株式会社キタックには、貴重な資料を頂き、調査のご協力を頂いた。