

非火山性地殻活動地域における大学による地磁気観測: 東大地震研を例に

小河 勉(東大地震研究所)

Geomagnetic observation by universities in non-volcanic active area: ERI case

OGAWA Tsutomu (ERI, Univ. Tokyo)

Geomagnetic observation by universities in non-volcanic active area, traditionally performed using the proton precession magnetometers suffers from its difficult property of the total geomagnetic intensity, together with its small usefulness in the geomagnetic studies. Recent attempts to observe vector geomagnetic variations and their analyses are introduced.

はじめに

非火山性地殻活動地域における地殻活動電磁気学研究を目的とした大学による地磁気観測は、その労力の大きさや観測を支える体制の縮小、またイベントが低頻度であり研究成果にそのままでは直結しにくいなどの要因を背景に、近年、縮小傾向にある。そのような中で、以下では東大地震研究所による観測を例に、観測の現状と、データ解析の最近の例を述べる。

以下、CA 研究会における講演の講演録という性格から、ややエッセイじみた文章となることをお許しいただきたい。

## 1. 既存観測点の観測点分布

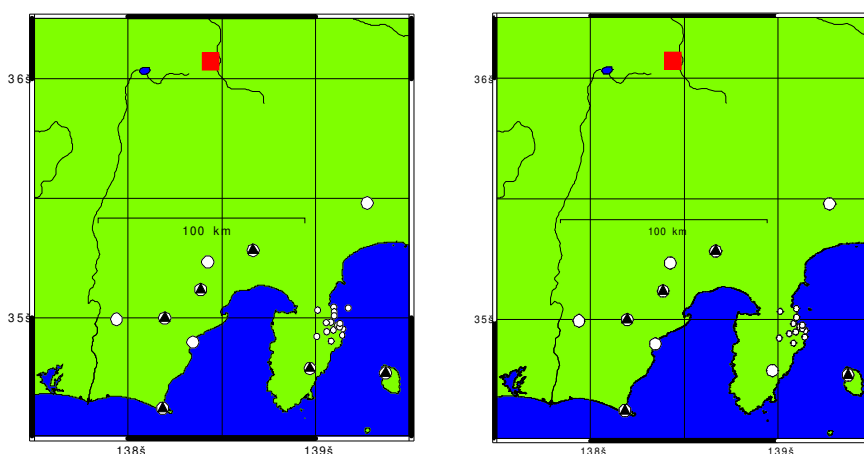


Figure 1: Observation points in 2014 (left) and 2021 (right). Open circles and triangles show the locations of the proton precession magnetometers and the fluxgate magnetometers, respectively. A red square represents the location of Yatsugatake Geoelectromagnetic observatory (YAT).

Figure 1に東大地震研究所が展開する地磁気観測点のうち、伊豆・東海地方の観測点分布を示す。かつての地震予知計画や伊東群発地震を背景に、主要にはプロトン磁力計を用いた全磁力観測網が展開され、全磁力の地点差の時間変化の監視が続けられてきた。八ヶ岳地球電磁気観測所(YAT)はその基準点、参照点として全磁力、三成分変化の両方を観測する他、東海地方においては限られた観測点のみにおいてはあが三成分変化を観測し、地磁気変換関数の時間変化の監視も試みられてきた。伊東群発地震の静穏化に伴い、伊東市周辺における全磁力観測は徐々に観測点数を削減しつつある。他方、2014年度以降、石垣島・西表島における全磁力観測・三成分変化観測に新たに着手した。

## 2. 大学による非火山性地殻活動地域における地磁気観測の困難

筆者は上記地磁気観測点の保守とデータ処理に従事し、かねてから、大学による非火山性地殻活動地域における地磁気観測にはいくつもの困難を有していると考えている。それらを以下に列記する。

### 2.1 観測の意図・動機

観測点を展開するにあたり、地殻活動に伴う地殻活動起源の地磁気変化を検出し、その成因の解明を通じて地殻内部における物理・化学過程の解明に資するという意図や動機が挙げられる。しかし、非火山性地殻活動、つまり沈み込み帯や活断層の周辺における地震、特に大規模地震は頻繁には発生しない。

現象が低頻度である一方で、観測点の保守にかかる労力は膨大で、しかもいざ現象発生の際に欠測とあればこれは観測者の失態として扱われる圧力にさらされている。すなわち恒常的に良質のデータを取る責務を常に負った「常時戦時体制」が観測者には課せられる。

その上、得られるデータの大半は、現象が生じていない平常時のものであるにもかかわらず、従来これをつぶさに見ることに関心が十分払われていたとは言えない。その要因は大きく2つ挙げられる。一つは先述した観測点保守にかかる労力であり、もう一つは、現象が頻繁には起こらないことを前提として、平常時には観測者が理論研究に傾注する傾向があったことである。

### 2.2 観測量

先述した通り、観測量は主要には全磁力の毎分値であり、データ処理には特に夜間値のみを用いてきた。

しかし地磁気はベクトル量であり、地磁気ベクトルは重ね合わせの原理が効く物理量であるだけでなく、Maxwell 方程式と物質の構成則のみで記述された物理量である。一方、全磁力はそのような物理量ではない。全磁力毎分値が観測網で得られたとしてもその活用が他用途で追求されることなく推移してきた背景には、このような事情に由来するものと考えられる。

ただし地磁気多点観測を実現する上で、廉価な入手が可能となったプロトン磁力計を用いた全磁力観測に注力された事情は歴史的及び技術的背景として念頭に置く必要がある。

### 2.3 解析・データ処理

蓄積された解析結果は、得られた全磁力データの地点差の日平均値、もしくは夜間平均値の時系列である。全磁力差が重ね合わせの原理が効かない物理量の差であることを考慮すれば、まずこれは本来の物理量である地磁気ベクトルの変化量の或る近似であるが、その近似の程度が明瞭ではない。特に火山地域における全磁力地点差の時間変化は熱消磁・熱帯磁に伴う全磁力変化自体が大きいことと対比して、非火山地域における地殻活動起源の全磁力変化量は1nTのオーダーであることが想定されて小さい。いわゆる全磁力地点差の「3成分補正」を行ったとしても、精度を吟味するためには係数推定に伴う予測誤差の推定は本来必須である。全磁力地点差の推定に関連するこのような労苦は、三成分変化連続観測の追求の労苦に比して有益とは考えにくい。

### 2.4 解析結果の比較対象

地磁気データの解析結果の解釈における比較対象として、主要には断層運動、特に大規模地震の本震が用いられる。ただし伊東群発地震においては地殻変動観測結果も参照されてきた。いずれにせよ地磁気観測の並行観測物理量は地震及び幾何測地であり、ピエゾ磁気効果に由来する本震時の地磁気変化を論じる場合には、全磁力データの解析結果と、本震後に推定される断層パラメータに基づく理論計算とを比較してきた。

他方、流体移動に関連した地磁気変化に着目する場合には、これが質量移動を伴うため、重力連続観測との並行観測が有用となる。また流体移動に起因する地球物理現象を地磁気・重力並行観測データの相互参照によって解明対象とできれば、本震のみならずスロー地震も含め、論じることが可能となることも期待できる。

### 2.5 大学固有の地磁気観測とデータ解析手法開発の新構築へ向けて

以上をまとめ、大学による実施に相応な、非火山性地殻活動地域における地磁気観測及びデータ解析手法開発の新しい構築について、試論を次のように整理する。

大規模地震が低頻度であることを前提に、地磁気観測データは地殻活動との関連が不明な期間のデータでも有効に活用できるよう観測を立案できるとよい。その際、全磁力の毎分値とその地点差の議論を越え、三成分変化データを多点(複数点)で得られれば、データの有効活用により資する。そして地殻内部応力場のみならず地球内部物理のより大きな枠組み、例えば流体移動やスロー地震などとの関連が議論できるような地磁気観測が実現できれば、大学による地磁気観測の使命がより果たせるものと期待される。

### 3. 新しい試み：八重山諸島における地磁気三成分変化観測とそのデータ

#### 3.1 八重山諸島に特有な地球物理的諸条件

八重山諸島は石垣島以西の国内最西端に位置する島々である。2015 年以来、全磁力毎分値と三成分変化毎秒値とを石垣島にて一地点、西表島にて一地点で、欠測を度々はさみながら観測を継続している。

地磁気観測の観点では、八重山諸島は気象庁地磁気観測所父島観測点及び国土地理院地球電磁気連続観測装置沖縄よりも低緯度かつ西方に位置する。石垣島では沖縄県の本土復帰後に国土地理院によって一度、一等磁気測量が実施されている。八重山諸島は国土地理院による国内の地磁気変化モデル(阿部・宮原, 2015)に限らず、国内の地磁気変化モデルにおける空間範囲の周縁部に位置するため、DC 的地磁気変化の標準場・異常場への分離とその解釈には精度の考慮が必要となる地域でもある。

一方、琉球弧に位置する八重山諸島においては、年に約 2 回、スロースリップイベントが発生していることが GNSS 観測データの解析から示唆されている(片岡, 2009)。想定される矩形断層は、西表島全域と石垣島南東部を含む領域の直下、フィリピン海プレートとユーラシアプレートの境界に位置している。



Figure 2: Geophysical observation points on Ishigaki (right) and Iriomote (left) islands.

このような八重山諸島に特有な地球物理的諸条件において、複数項目の固体地球物理観測が石垣島、西表島で展開されている(Fig. 2参照)。幾何測地、物理測地(重力)、広帯域地震観測などの観測点と並存する形で地磁気観測点が設置されている。なお、八重山諸島には直流電車の路線が存在しないことは地磁気観測にとって低ノイズのデータを得る上で好条件であると言える。

#### 3.2 得られた地磁気データ

以下、石垣島名蔵地磁気観測点(NGR)で得られた三成分変化を、気象庁地磁気観測所の女満別(MMB)、柿岡(KAK)、鹿屋(KNY)、父島(CBI)の各地点及び国土地理院の沖縄(OKI)における地磁気三成分変化と比較する。ただし NGR においては絶対観測による基線値の取り付けは出来ておらず、相対変化のみに着目する。

##### 3.2.1 地磁気永年変化

Figure 3に月平均値から地磁気永年変化を示す。2016 年 4 月を起点として以後の相対変化を図示するが、NGR における変化は水平 2 成分においては OKI と酷似し、NGR のデータに偏角の基線値を取り付けていない

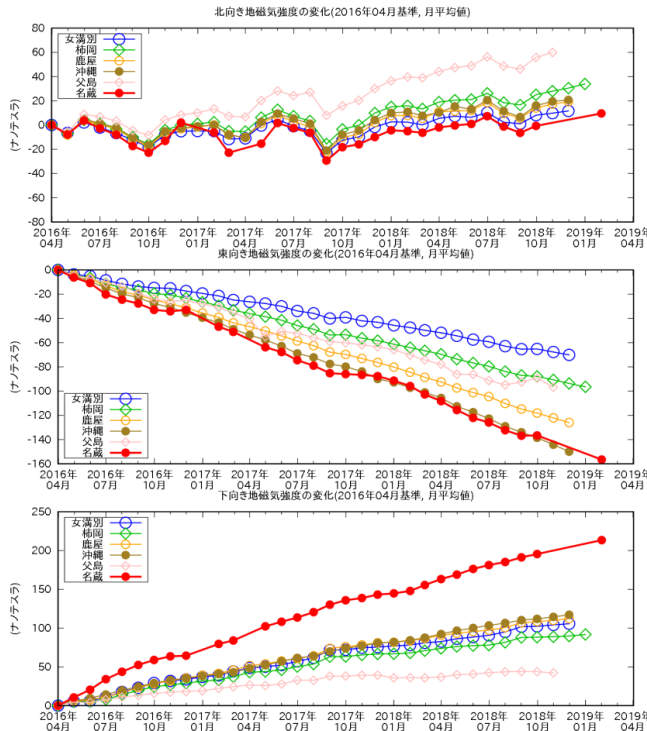


Figure 3: Secular variations observed at MMB, KAK, KNY, OKI, CBI, and NGR. From top to bottom, X, Y, and Z, respectively.

### 3.2.3 磁気嵐に伴う地磁気変化

Figure 5に、毎分平均値を用いて2017年9月の急始型磁気嵐に伴う地磁気変化を図示する。Xの変化に着目すれば、NGRにおける変化は他地点と比較して、一度目の急激な減少幅は最小である一方、二度目の急激な減少幅は最大である特徴が示されている。またYの変化では低緯度ほど小振幅である。

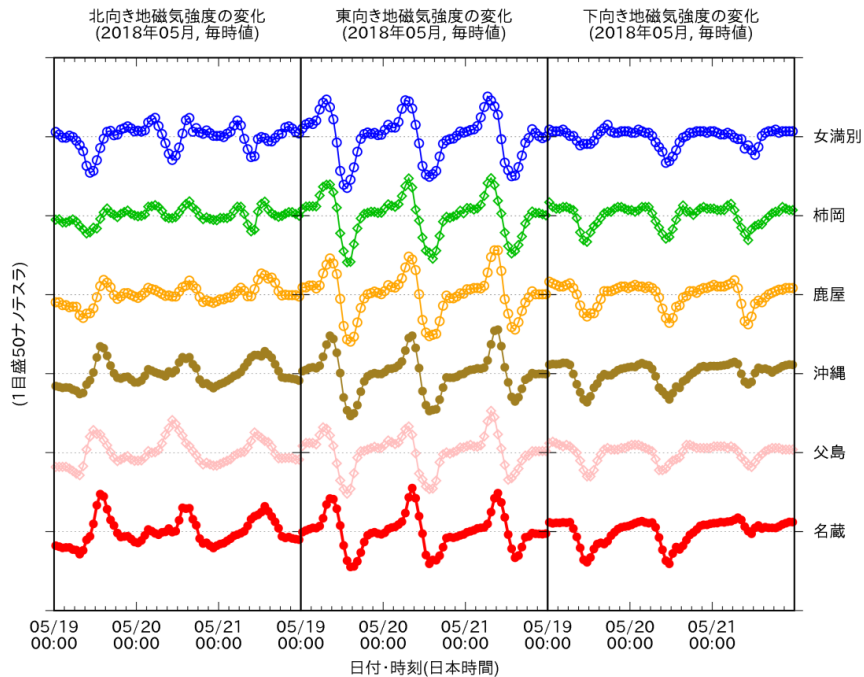


Figure 4: Sq variations for three days including international solar quiet days. From top to bottom, MMB, KAK, KNY, OKI, CBI, and NGR, respectively. From left to right, X, Y, and Z, components, respectively.

ことを考慮すればOKIとの間で有意な差異は無いものとみなせる。一方、鉛直成分については増加速度がOKIの約2倍である。センサーの系統的傾動の可能性など、DC的地磁気変化の解釈には困難が伴う。繰り返し絶対観測による基線値の同定などにより、この精度は吟味が可能となりえるが、地理的及び気象条件上のアクセスの困難さにより、実施に至ってはしない。大学による地磁気観測においては、この条件が好転する機会の到来は現状では期待し難く、故に地磁気永年変化の精密な議論は今後も困難な状況が継続することが想定される。

なお、使用するフラックスゲート磁力計の温度特性による基線値の季節変動の大きさは、見ている地磁気変化量に比して、必ずしも顕著ではないことも看取される。

### 3.2.2 地磁気静穏日日変化

Figure 4に、毎時平均値を用いて国際静穏日を含む3日間の日変化を図示する。図示した6地点の中で最も西に位置するNGRの位相が最も遅れることは自明であり、更に最も緯度が低いことからXの変化の極性がMMBやKAKとは反転し、かつ振幅がOKIやCBIよりも大きいことが示されている。



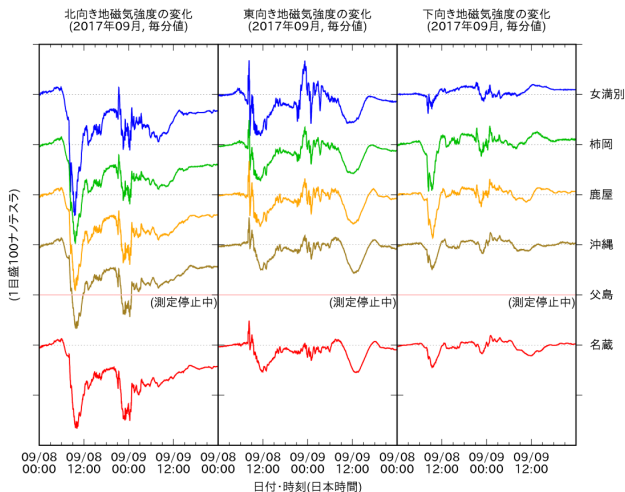


Figure 5: Geomagnetic variations accompanying a geomagnetic storm in September 2017. From top to bottom, MMB, KAK, KNY, OKI, CBI, and NGR, respectively. From left to right, X, Y, and Z, components, respectively.

### 3.2.4 不規則地磁気脈動

NGRは6地点の中では最も低緯度に位置し、高緯度地域で大振幅となる地磁気脈動の表れ方が最も小さいことが期待される。Figure 6に気象庁地磁気観測によって周期50秒と特定された2018年9月11日の不規則地磁気脈動を、毎秒値を用いて図示する。ただしOKIでは毎分値計測につきデータを図示していない。この図からは最も低緯度に位置するNGRにおいても不規則地磁気脈動が有意に看取できる。ただしXとYの振幅の強弱がNGRについて低緯度に位置するCBIやKNYと逆転しているようにも読み取れる。処理手順の上で、NGRに限ってXとYとを取り違えているわけではないことは確認を繰り返している。したがってこのような逆転の成因は信号処理手順上の過誤ではなく、水平成分への地球内部電気伝導度不均質の影響の混入の仕方や、不規則地磁気脈動の現象そのものが持つ性質に由来するものと想定される。

### 3.3 八重山諸島における地磁気三成分変化観測の到達

以上、序報的に示した八重山諸島における地磁気三成分変化観測の結果は、一回のスロースリップイベントの継続期間が約1ヶ月であることを念頭に置けば、これに伴う地殻活動起源の地磁気変化量が磁力計の内部雑音及び計測最小分解能に比して検出可能な大きさである場合に、検出が十分期待できることを示唆する。また地磁気永年変化に関する議論を除けば、地殻活動起源ではない地磁気現象の研究に対しても、有用なデータの提供の可能性が期待できることも示されている。今後、得られた地磁気データの重力データ、GNSSデータ、低周波地震活動などの対比を見込んでいる。

## 4. 不規則地磁気脈動水平成分の国内の観測点における見え方の差異

Figure 6に示された、不規則地磁気脈動と同一時刻の異なる観測地点における水平成分の変化の異なる見え方については、地球内部電磁気学研究においては水平成分間の地磁気変換関数として表現され、地球内部電気伝導度不均質に由来するものと解釈されると見込まれる。脈動の波形を直接に目視することは必ずしも必須とされないその作法について、ここで筆者は異論をはさむものではない。が、これを地磁気現象として詳細に観察することは、例えば地震学における地震波計の観察と同様、地球電磁気研究における初等的な所作に属する行為ではないかと推察する。Figure 6に示されるような、緯度依存性だけでは説明できない不規則地磁気脈動水平成分の観測地点ごとに異なる見え方について、既存の地磁気データでも同様に存在することを、気象庁地磁気観測所のMMB、KAK、KNY、CBI及び国土地理院の鹿野山(KNZ)及び水沢(MIZ)における毎秒値から示した一例をFigure 7に示す。

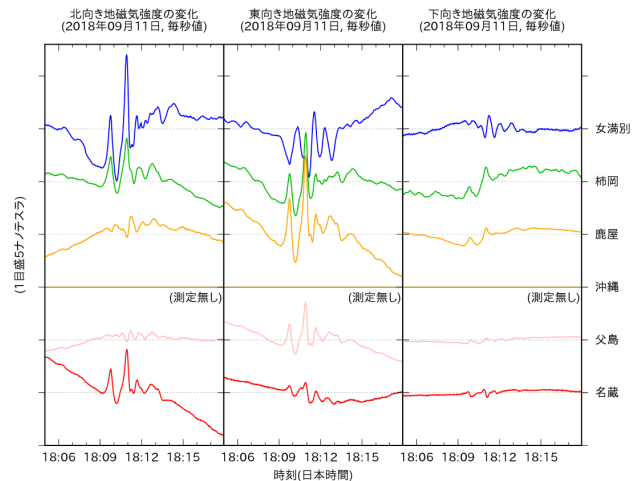


Figure 6: Geomagnetic variations accompanying a geomagnetic pulsation on September 11, 2018. From top to bottom, MMB, KAK, KNY, OKI, CBI, and NGR, respectively. From left to right, X, Y, and Z, components, respectively.

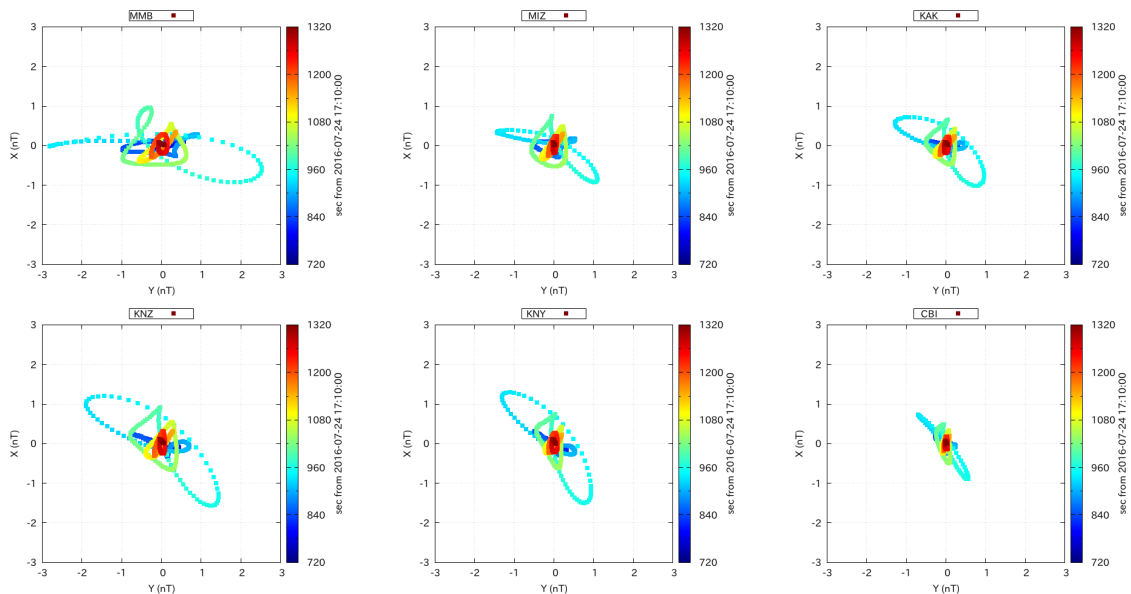


Figure 7: An example of horizontal particle motions of an irregular geomagnetic pulsation observed on July 24, 2016 at MMB, MIZ, KAK (upper, from left to right), KNZ, KNY, and CBI (lower, from left to right).

気象庁地磁気観測所によって、MMBにおける地磁気データから、周期60秒の不規則地磁気脈動が同定された2016年7月24日17時23分(世界時)頃の地磁気データを切り出し、周期150秒のハイパスフィルターを適用してその軌跡を水平面上に投影して図示している。得られた結果からは、最も高緯度に位置するMMBにおいて振幅が最大であることが看守されるが、MMBにおけるイベントは主要には東西方向に振動する現象だったことが示される。一方、6地点の中で最も低緯度に位置するCBIにおいては南北方向に卓越した直線的な振動として観測されたことが示されているが、その南北方向の振幅は、MMBに次いで高緯度に位置するMIZにおけるそれと同程度以上である。またKNZ、KNYにおける振幅はMIZ、KAKにおける振幅よりも大きい傾向があり、KNZでは比較的東西方向に、KNYでは顕著に南北方向に卓越した現象となっている。

MMBにおける不規則地磁気脈動と同時刻の、このように異なる観測地点で見られる地磁気現象の差異を、地球内部電磁気学コミュニティにおいては、データ処理上は地磁気変換関数の算出により、物理モデルとしては電離圏・磁気圏に対して何らかの仮定された電流系を入力とみなし、地球内部電気伝導度不均質構造のチューニングによってデータの説明を試みるものと目される。その適否は地磁気三成分変化観測の更なる多点化がある回答を与え、長波長な空間的傾向が電離圏・磁気圏の現象と関連付けられるものと期待される。

## 5. まとめ

非火山性地殻活動地域における地磁気観測は、従来の全磁力毎分値観測から地磁気三成分変化毎秒値観測の多点化によって、そのデータが本来の地殻活動電磁気研究の枠を越えた地球電磁気研究に資する可能性が示唆される。伊豆・東海地方における地磁気観測網をこのように更新することが、他方面の研究にも新たな寄与をもたらすことも期待される。

## 謝辞

石垣島における全磁力・地磁気変化三成分変化観測は防災科学技術研究所との共同研究で実施しています。また国土地理院、気象庁地磁気観測所が公開する地磁気データを解析で用いました。記して謝意を表します。

## 参考文献

阿部聡, 宮原伐折羅(2015), 主成分分析を用いた日本周辺の地磁気変化モデルの開発, 国土地理院時報, 127, 129-152.  
片岡健(2009), 西表島で半年毎に発生するゆっくり地震, 北海道大学大学院理学院, 修士論文.