

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：22604

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23686130

研究課題名(和文)地震波を使わない地震発生検知網の開発 地球磁場観測と最速警報

研究課題名(英文)Development of earthquake detection network using geomagnetic field observation

研究代表者

大久保 寛 (OKUBO, KAN)

首都大学東京・システムデザイン研究科・准教授

研究者番号：90336446

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,700,000円

研究成果の概要(和文)：地震の発生をいち早く検知するにはどのような方法が有効だろうか。本研究では、地震発生をこれまでよりも数秒早く知るための新しい地震検知技術とその検知を実現するための超高感度な地球磁場(地磁気)センシングシステムの研究開発を検討している。いわき観測点における高温超電導SQUID(HTS-SQUID)磁力計システムによる高感度地磁気観測を実施した。HTS-SQUID磁力計によって観測された地球磁場信号の波形を評価した。世界初のHTS-SQUID磁力計による野外地球磁場計測が成功している。

研究成果の概要(英文)：We introduce long-term precise geomagnetic observations using high-temperature-superconductor based superconducting-quantum-interference-device (HTS-SQUID) magnetometer system at the IWAKI observation site. By our past study, it was suggested that the geomagnetic variation signal accompanying fault movement, whose sources are the piezomagnetic effects, is very small, therefore development of a high-sensitive magnetometer system is very important. Our research group developed the HTS-SQUID magnetometer system for high-resolution observation of Earth's magnetic field. Since 2012, we have observed 3 components of the geomagnetic field using a HTS-SQUID magnetometer at Iwaki observation site in Fukushima, Japan. The sampling interval of the magnetometer is 0.02 sec. The observation clock has been synchronized by use of GPS signals. An accelerometer is also installed at observation point. We have showed the feature of our HTS-SQUID magnetometer and evaluation results.

研究分野：波動情報工学

キーワード：地球磁場観測 地震 ピエゾ磁気 断層運動 地震警報 磁場変化

## 1. 研究開始当初の背景

- (1) 地震との遭遇は、複数のプレートの衝突領域の上で暮らす我々日本人にとって決して避けられないことである。ここ日本で暮らしていれば、必ず一生に一度や二度は大きな地震を経験するだろう。しかし、地震は避けられない事象ではあるが、防ぐこと、そしてその被害を小さくすることは可能である。
- (2) 次の巨大地震が起こったとき、どこにいるだろうか。巨大ビルのエレベータの中にいるかもしれない、新幹線に乗っているかもしれない、電車で揺られているかもしれない、病院のベッドで手術を受けているかもしれない。その時に、巨大地震が発生したらどうなるだろうか。
- (3) そんな巨大地震が発生したときに、その発生をいち早く知ることができれば、エレベータや新幹線・電車を緊急停止させることができるし、また、病院で手術執刀中の医師の手を止めることができるだろう。このようなケースは、まさに1秒、2秒を争うことであり、地震の発生を少しでも早く知ることができれば、多くの生命を救うことにつながるのである。
- (4) 本研究では、この地震の発生をこれまでよりも数秒早く知るための新しい画期的な地震検知技術とその検知を実現するための超高感度な地球磁場(地磁気)センシングシステムの研究開発を行っている。

## 2. 研究の目的

- (1) 地震の発生と検知法  
日本列島付近を含む多くのアジア・オセアニア地域は火山帯に属しており、更に我が国は複数のプレートの衝突領域の上に国土を有しているため、非有感地震を含めると常日頃から莫大な数の地震が発生している。そのため、地震に関する研究は古くから盛んに行われてきている。しかし、現代の情報化社会においても、地震に関する現象については未だにわからないことが多くあるのが実情である。例えば、地震学におけるアスペリティモデルも近年徐々に明らかになってきたことであり、実は地震発生のメカニズムは未知のことだらけである。  
地震発生の検知法について見てみると、一般に公開されているのは、気象庁を中心にして提供されている「緊急地震速報」である。しかし、現時点で提供されるその情報が常に役立つかという点、国民の多くがまだその域には達していないと感じるのではないだろうか。現在の緊急地震速報システムにおいて「あと、数秒早ければ…」という状況を実際に体験したことがある人も多いだろう。

大地震発生時においては、そのわずかな数秒が極めて重要となる。現在のこの警報システムは地震波の縦波である P 波を検知してから警報を出す方法を用いているため、どんなに発令を急いでも地震が発生してから P 波が観測点に到達するまでの時間遅れは必ず発生する。これは大地中を進む弾性波のスピード(数 km/s)の限界と言える。そのような状況下で、1秒でも早く検知するためにはどうすればよいか、という課題に対しては、いくつかのアプローチが考えられる。例えば、(1) 縦穴を深く掘り、地震計を高深度に埋設する(原理的には P 波の速度を考えると約 6km 掘れば、1秒早く検知できる)、(2) 検知アルゴリズムを高速度化する、(3) 他の観測要素を用いる、などの取り組みが考えられる。

## (2) 地震の検知と電磁現象

地震を含む地殻変動と電磁気現象は、古くからその関係が検討されてきており、多くの研究が報告されている。しかし、地震と同時に観測された疑いのような電磁場変動の報告はほとんどなく、一般に認められている成果はないという現状であった。

そこで、我々の研究グループでは、これまで一貫して、まず地震との因果性を示しやすい地震発生時と地震発生後の電磁現象にスポットをあて研究を続けてきている。その中で、岩手・宮城内陸地震発生時には細倉観測点において地震断層運動に伴って発生する磁場変化を明確に観測することに成功した。この観測結果は、地震発生時に変化する動的な磁場変動を記録し、地震と電磁現象の関係性を初めて明確に示した貴重なデータとなっている。

## 3. 研究の方法

### (1) 地球磁場(地磁気)の変化による地震発生検知

地震現象と磁場変化には因果関係があるとされ、50年以上の議論が続いてきている。これまでの地震に伴う地磁気変化の観測としては、地震の発生前後で地磁気の数値が変動したことが報告されていた。しかし、この報告ではデータ記録機器のサンプリング時間が10分であり、地震発生と同時に観測された信号を得ることはできていなかった。

そのような背景の中で、我々の研究グループは2008年岩手・宮城内陸地震(M7.2, 震央 39° 01.7' N, 140° 52.8' E)において、断層運動に伴って変化する地磁気信号を観測することに成功した。これは世界で初めての断層運動に伴う動的な磁場変動を観測した結果である。

### (2) 地震時の応力解放とピエゾ磁気効果

なぜ地震の断層運動に伴って磁場変化が観測されるのだろうか。これはピエゾ磁気（圧磁気）効果と呼ばれる現象が原因と言われている。物体にかかる応力と物体内に生じる磁場には関係性があり、断層周辺には長い月日をかけて応力が蓄積されているが、地震が発生すると、断層運動によって断層周辺の応力分布が変化することになる。この応力変化に伴ってピエゾ磁気効果で断層周辺の磁場環境が変化するので、我々は磁力計を設置することでその変化を観測することができる。

地震と同時に発生した磁場変化は、大地中をほぼ光速（大地の誘電率のため、空气中に比べて 1/3 程度）で伝わるので、震源からの距離にもよるが数十 km 程度とすると、地震発生後のミリ秒以内には、観測点の地球磁場に変化が生じる。これをしっかり検出することができれば、地震を発生直後に知ることができるのである。

#### 4. 研究成果

##### (1) 超高感度磁力計システムの開発

震断層運動に伴って発生する磁場変化を計測できれば、現在の緊急地震速報よりも数秒早い検知が可能となる。しかし、このシステムを実現するためには重要な問題がある。それは、地球磁場観測における感度の問題である。岩手・宮城内陸地震時に観測された磁場変化量は、震源距離が 26km 程度の細倉観測点において数 100pT 程度であった。これは、観測点やその環境によっては、計測できる磁場の変化量が、さらに小さい可能性を示唆している。したがって、今後このシステムを実現するには、超高感度磁場計測技術が不可欠である。

さらに、地球磁場観測は屋外で行われるため、高感度であるだけでなく、(1) 温度依存性の少ない磁力センサであること、(2) 地震はいつ起こるかわからないため、連続観測を行う必要がある。このため、連続運用にも耐えるシステムであること、という要素も重要となってくる。

そこで我々の研究開発グループは、地球磁場（地磁気）観測用の高温超電導 SQUID (HTS-SQUID) 磁力計システムの開発を試みた。この HTS-SQUID 磁力計の特徴としては、(1) 磁場 3 成分を高感度に計測できること、(2) 温度特性が極めて良いこと、(3) 液体窒素によって超伝導を維持できるため、ランニングコストが小さいこと、などのメリットが考えられる。特に地球磁場観測には長期の連続観測が不可欠であり、将来的には多点観測が望まれることを考えると、超伝導状態を液体窒素で維持でき

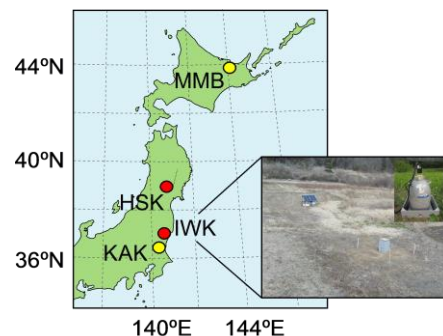
るという点はシステムの実現可能性を大いに高めるものである。

下図に地球磁場観測用の HTS-SQUID 磁力計を示す。野外計測に対して、50 日程度の間隔で液体窒素の補充を行うことにより超伝導状態を維持し続けることが可能である。



地球磁場観測用の HTS-SQUID 磁力計

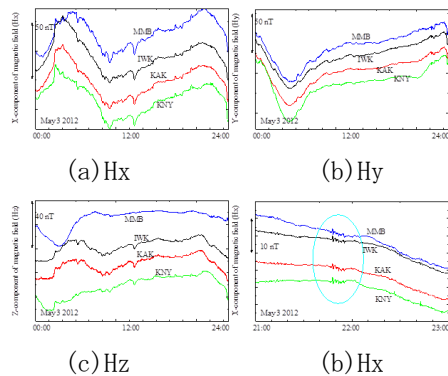
我々は、HTS-SQUID 磁力計の作製後、気象庁柿岡地磁気観測所における検証を行った後、実際に地球磁場を連続観測するフィールドとして、いわき市（福島県）にいわき観測点（下図）を設け、常時観測を開始している。図中の各観測点は、細倉観測点 (HSK) 及び気象庁の地磁気観測所である柿岡 (KAK) と女満別 (MMB) である。いわき観測点は、商用電源は用いず、太陽光発電と電池によって全システムを運用している。また、ネットワーク経由で研究室からリアルタイムに制御することができる。安定運用ができており、野外観測において、HTS-SQUID 磁力計を長期間にわたり、連続運用した例は他にはない。



いわき観測点 (IWK, 福島県いわき市)

下図に、いわき観測点で HTS-SQUID 磁力計によって観測された地球磁場信号の波形を示す。同図は 0:00-24:00UT の一日の波形で、(a)、(b) および (c) は、それぞれ磁場の南北方向成分 ( $H_x$ )、東西方向成分 ( $H_y$ ) 及び鉛直方向成分 ( $H_z$ ) を示している。図中には比較のために、気象庁地磁気観測所の柿岡地点 (KAK)、女満別地点 (MMB)、鹿屋地点 (KNY) もあわせて表示している。これより、地球

規模の日変化に関して、緯度の近い KAK と IWK の波形は非常によく一致しており、妥当な観測結果が得られていることがわかる。



いわき観測点における観測結果

(d)には、拡大波形として、21:00—23:00UTの波形を示している。これより、地球規模で発生するPi2地磁気脈動(Pi2地磁気脈動は、周期が40-150秒の不規則な波形をした地磁気の振動現象であり、磁気圏サブストームの発生時に地球規模で地磁気信号に出現することが知られている)も正確に計測できており、HTS-SQUID磁力計の野外での計測が成功していることがわかる。

本研究を進めるにあたり、野外観測を続けるために日頃より多くの方々にご支援を頂いている。細倉金属鋳業株式会社の社員の皆様をはじめ、関係各位に深く感謝する。日頃より多くの比較参照データのご提供を頂いている気象庁地磁気観測所および国土地理院に感謝する。また、いわき観測施設を維持するため、ご協力頂いている多くの皆様に心より感謝する。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計9件)

- ① 大久保寛, 香取勇太, 波頭経裕, 塚本晃, 田辺圭一, 大西信人, 古川克, 磯上慎二, 竹内伸直, いわき観測点における高温超電導 SQUID 磁力計による高感度地磁気観測, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第134回講演会, 高知大学(高知) 2013年11月3日
- ② 香取勇太, 大久保寛, 波頭経裕, 塚本晃, 田辺圭一, 大西信人, 古川克, 磯上慎二, 竹内伸直, 福島県浜通り地域の内陸地震発生時における地磁気変化の観測, 日本地震学会 2013年度秋季大会, 神奈川県民ホール(神奈川), 2013年10月7日
- ③ 大久保寛, 香取勇太, 波頭経裕, 塚本晃,

田辺圭一, 大西信人, 古川克, 磯上慎二, 竹内伸直, 高温超電導 SQUID 磁力計による高感度地球磁場観測とその応用, 応用物理学会春季学術講演会, 神奈川工科大学(神奈川), 2013年03月11日

- ④ Yuta Katori, Kan Okubo, Tsunehiro Hato, Akira Tsukamoto, Keiichi Tanabe, Nobuhito Onishi, Chikara Furukawa, Shinji Isogami, and Nobunao Takeuchi, Development of High Temperature Superconductor Based SQUID (HTS-SQUID) Magnetometer System for Super-sensitive Observation of Geomagnetic Field Changes, EGU General Assembly 2013, EGU2013-8632, Wien(Austria), April 2013
- ⑤ 香取勇太, 大久保寛, 波頭経裕, 塚本晃, 田辺圭一, 大西信人, 古川克, 磯上慎二, 竹内伸直, 福島県いわき観測点における高感度 HTS-SQUID 磁力計による地磁気観測システム, 平成24年度CA研究会, 柿岡地磁気観測所(茨城), 2013年1月10日
- ⑥ 大久保寛, 香取勇太, 波頭経裕, 塚本晃, 田辺圭一, 大西信人, 古川克, 磯上慎二, 竹内伸直, HTS-SQUID 磁力計を用いた地震発生時の地球磁場変化の高感度観測, 平成24年度CA研究会, 柿岡地磁気観測所(茨城), 2013年1月10日
- ⑦ 大久保寛, 香取勇太, 波頭経裕, 塚本晃, 田辺圭一, 大西信人, 古川克, 磯上慎二, 竹内伸直, 高温超電導 SQUID 磁力計による地球磁場観測, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第132回講演会, 札幌コンベンションセンター(札幌), 2012年10月22日
- ⑧ 波頭経裕, 塚本晃, 安達成司, 押久保靖夫, 大久保寛, 竹内伸直, 磯上慎二, 大西信人, 古川克, 田辺圭一, 地磁気観測用高温超電導 SQUID システム, 2012年秋季講演会, 応用物理学会, 愛媛大学(愛媛), 2012年9月13日
- ⑨ 大久保寛, 地球磁場観測による地震発生検知と緊急地震速報の迅速化の可能性—地震断層運動に伴って発生する磁場変化とその応用—, 地震及び火山噴火研究の将来構想シンポジウム, 東京大学(東京), 2012年7月5日.

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

大久保 寛 (Kan OKUBO)・首都大学東京・システムデザイン研究科・准教授

研究者番号: 90336446