

地震の直前予測へ向けた
動物の前兆的行動に関する研究
(The research on unusual animal behaviors
prior to earthquakes intended for the realization of
the impending earthquake prediction)

2014 年 9 月

麻布大学大学院 獣医学研究科

動物応用科学専攻 博士後期課程

介在動物学

DA1105 山内寛之

目次

要約 1

序章 11

第一章：「東北地方太平洋沖地震」に関連した地震前兆的行動の横断調査

緒言 16

方法 19

結果 24

考察 30

結論 35

第二章：動物の行動頻度と地震との関連性に関する縦断調査

緒言 37

方法 39

結果 46

考察 57

結論 60

第三章：産業動物における生産性と地震との関連性に関する縦断的調査

第一節：地震前兆としての搾乳牛における乳量変化に関する調査

緒言 62

方法 64

結果 71

考察	・ ・ ・ ・ 82
結論	・ ・ ・ ・ 87
第二節：地震前兆としての採卵鶏における産卵率に関する調査	
緒言	・ ・ ・ ・ 89
方法	・ ・ ・ ・ 90
結果	・ ・ ・ ・ 96
考察	・ ・ ・ ・ 107
結論	・ ・ ・ ・ 111
総合考察：動物の行動変化による可能な地震の直前予測	・ ・ ・ ・ 113
謝辞	・ ・ ・ ・ 121
参考文献	・ ・ ・ ・ 122

要約

日本を含み、これまでに多くの国が地震による多大な被害を受けてきた。また近い将来、東南海地震・南海地震の発生が危惧されており、マグニチュード (M) 8 から 9 の巨大地震が緊迫していると考えられている(地震調査研究推進本部, 2013)。地震がいつ、どこで、またどのような規模で発生するかを予測し、その情報を適切に発信することができれば、多くの被害を低減できる。そのため、地震の数ヶ月前から直前にかけて現れる前兆現象の利用を含めた「短期地震予知」に関する研究が進められているが、現時点におけるこれらの実現は困難であると認識されている。

これまでに、地震の発生前には様々な物理的・化学的現象の異常や変化に加え、多くの動物種における行動変化も報告されてきた。このような動物の地震前兆的行動は、地震発生前に生じる何らかの物理的・化学的現象の異常や変化に対する、いわゆる「ストレス反応」の結果であると考えられている。動物が何に反応しているのかが具体的に明らかになれば、機械的にその現象を観測できるが、今のところ実現していない。前兆的行動は地震発生前1週間前から現れ始めるケースが多い (Buskirk *et al.*, 1981) ことから、地震前兆に現れる動物の変化を客観的指標により捉えることができれば、地震予知に対する一つのパラメーターとなる可能性がある。本研究は、地震の前に現れる動物の変化が地震予知に利用可能であるかを検証するため、これらの変化を様々な手法を用いて調査した。

第一章 「東北地方太平洋沖地震」に関連した地震前兆的行動の横断調査

一般家庭で多く飼育されている犬や猫に焦点を当て、2011年3月11日に発生したモーメントマグニチュード (M_w) 9.0 の「東北地方太平洋沖地震」の前に地震前兆的行動が現れていたかどうか、またどのような行動が多かったのかを web アンケートによって調査した。その結果、犬において 18.7% (236/1259)、猫では 16.4% (115/703) が地震の前に行動変化していたことが明らかとなり、行動変化を示した動物の半数以上は地震の 24 時間前までに変

化を示していた。また 1 日以上前に行動変化を示した動物は、行動変化を示した全体のうち、犬で 23.3%、猫で 25.0%であった。また変化した行動に関して、「落ち着きをなくす」行動がどちらの動物種でも最も多く報告された（犬; 22.5%, 猫; 23.7%）。地震前兆的行動の信頼性を検証し、地震予知に応用させるためには、長期間において定量化できる行動を観測する必要がある。本調査で得られた結果は、このような縦断的観測を行うための足掛かりになると考えられた。

第二章：動物の行動頻度と地震との関連性に関する縦断調査

第一章における調査で、地震前兆的行動として最も多く報告された「落ち着きをなくす」行動に着目し、縦断的に観測して複数の地震との関連性を検証した。また、第一章で対象とした動物種は犬と猫のみであったが、その他にも多くの動物種における前兆的行動が報告されており、本章では、猫、馬、および亀を用いて毎日の「行動頻度」を赤外線センサーによって 1 年間観測した。その結果、猫、馬、および亀において、一定範囲内で発生した M6 を超える地震の 1 週間前までに行動頻度が顕著に増加することが複数回あり、特に猫では 4 回中 3 回、顕著な増加が確認された。時系列解析の結果、Maekawa ら (2006) が考案した日々の地震活動量の指標となる実効マグニチュード (Meff; Effective Magnitude) が 5.5 以上の日の 1 週間前以内に、猫と亀における行動頻度が有意に増加していた。本実験での観測期間や供試数は限られていたが、これらの動物は地震の数日前に行動変化を示すことが示された。

第三章：産業動物における生産性と地震との関連性に関する縦断的調査

第一節：地震前兆としての搾乳牛における乳量変化に関する調査

第二章において、地震の数日前に行動変化が現れることが確認されたため、第三章 第一節では、長期間における多くの個体を用いた検証が可能である、搾乳牛における日々の乳量

に焦点を当てた。搾乳牛における乳量はストレス刺激に暴露されることによって減少することから、地震前兆に現れる刺激に反応する場合、減少している可能性がある。本節では、地震に先立って搾乳牛における乳量が減少するかどうかを検証するため、3箇所の異なる地域に位置する牧場で測定された個体別乳量と複数の地震との関連性を、約2年間のデータを用いて調査した。搾乳牛の乳量は分娩後経過日数や環境温度、相対湿度により変動するため、これらの要因による影響を除去した後に地震との関連性を検証した。まず、東北地方太平洋沖地震に先行した乳量の変動があったかを検証した結果、地震の3日前から6日前にかけて、震源地から最も近い距離(340km)に位置する牧場で有意な乳量の減少がみられた($P < 0.01$)。また、複数の地震との関連性を検証した結果、全ての施設における毎日の乳量平均値は、 $M_{eff}5.0$ 以上($M = 6.0 \pm 0.1$)の日の15日前までに有意な負の相関を示した。また、 M が大きくなるにつれ乳量がより減少していることも明らかとなり、毎日多くの地域で測定されている乳量は、地震予知へ応用できると考えられた。

第二節：地震前兆としての採卵鶏における産卵率に関する調査

第二節では、乳量と同様、毎日記録がされており、ストレス刺激によって低下することが知られている採卵鶏の産卵率に焦点を当てた。4箇所の異なる地域に位置する養鶏場で記録された3年間の鶏群別産卵率データを用いて、複数の地震との関連性を検証した。産卵率は日齢や環境温度、相対湿度によって変化するため、これらの要因による影響を除去してから地震との関連性を検証した。まず、東北地方太平洋沖地震に先行した産卵率の変動の有無を検証した結果、震源地から390km離れた施設において有意な低下が地震発生の7日前と9日前にみられていたことが明らかとなった。複数の地震との関連性を検証した結果では、 $M_{eff}5.0$ 以上($M = 6.2 \pm 0.1$)の日の27日前までにおける全施設の産卵率平均値は有意に減少していた。また、震源地からの距離が近いほど産卵率は低下し、約 $M5$ 以上の地震では、 M が大きいほど産卵率が低下することも明らかとなった。

本研究により、複数の動物種において地震の前に行動が変化することが明らかとなった。地震は発生する場所や日時が不明なため、観測する前兆現象は長期間にわたり多くの場所で観測できなければならない。搾乳牛と採卵鶏における生産データは多くの地域でほとんど毎日、測定と記録がされていることから、これらの情報を収集できれば地震予知に利用できる。また第一章では、地震の前に犬と猫が「落ち着きをなくす」ことが多く、この行動の多くは24時間以内に現れており、さらに第二章では猫の行動頻度は地震の数日前にも変化することが明らかとなった。このことから、これらの伴侶動物における行動を自動的に観測できる手法の考案が望まれた。

そこで本研究では、動物の行動を用いた地震予知に必要なモニタリングシステムの原型をいくつか考案した。まず、産業動物における生産データを毎日一元化できるよう、クラウドコンピューティングを利用した生産データの収集システムを考案した。また伴侶動物の行動頻度に関して、より簡便にデータの自動収集ができる活動量計に着目し、現在、一般家庭の猫への応用を試みている。

地震前兆現象には動物の他に電磁気学的異常や、ラドン濃度の異常などが知られている。その中には現在、既に地震予知に向けた観測を継続しているものもある。本研究で対象とした前兆的行動は地震との関連性を統計的にある程度明らかにできたが、地震に関連しない変動もみられ、動物の行動だけに頼る予測は誤報を生み出すかもしれない。したがって地震予知は、複数の現象を統合して行うことでより精度の高めることができると考えられる。

これまでに得られた全ての結果と先行研究の結果を踏まえ、考案した地震予知の方法は以下のようなものである。

- ① 乳量や産卵率、その他の物理的・化学的現象を観測してその情報を統合し、まずある程度の地震発生危険度を予測する。
- ② これらに変化が現れた時、伴侶動物の行動変化にもより注意を払うことによって、より詳細な地震発生確率や地震発生日時を予測する。

このようなシステムが、動物の行動を中心に用いた最も可能な地震の直前予測の方法であると考えられる。また、多くの観測点における異常の有無から、「どこで」発生するか、その異常の大きさから「どの程度の」規模の地震かも予測できると考えられる。今後これを実現させるためには、様々な機関との学際的交流が必要となる。また、より多くの地域における情報を収集して、異常（前兆）の有無を解析し、地震の発生危険度に関する情報発信を持続的に行えるシステムを構築するには、専門機関の設立や、社会からの支援が重要な課題になると考えられる。

Abstract

Many countries, including Japan, have suffered from extensive damage due to earthquakes (EQs). In Japan, there is the possibility that more large EQs, such as the Tonankai and Nankai EQs, may occur in the near future. The Headquarters for Earthquake Research Promotion assumes that these EQs would occur with a magnitude (M) of 8 to 9. If the date, location and the M of such EQs could be predicted, then it would reduce the human loss and material damages. There are reports of anomalies related to various physical and/or chemical phenomena occurring from a few months to the last minutes before EQs. Many researchers have studied the use of such unusual phenomena in making short-term EQ predictions. However, the application of these predictions is regarded as being extremely difficult at the present time.

Precursors of EQs include not only changes or abnormalities in physical and chemical phenomena but also changes in various animal behaviors. These unusual animal behaviors prior to EQs are considered the results of stress or emotional responses to some physical or chemical variation. If we could identify what phenomena trigger the unusual animal behaviors prior to EQs, then we could measure and observe these phenomena by machines to predict EQs. However, clear mechanisms behind the unusual animal behaviors have remained unidentified.

The object of this study was to verify whether animal behavioral changes prior to EQs are useful for predicting EQs. To achieve our objective, we surveyed and observed these behavioral changes using various methods.

Chapter 1. The cross investigation into unusual animal behaviors preceding the 2011 earthquake off the Pacific Coast of Tohoku, Japan

On 11 March 2011, a megathrust EQ with moment magnitude (M_w) of 9.0 occurred in the northwestern Pacific Ocean at a shallow depth of 24 km, which is formally named “The 2011 off the

Pacific coast of Tohoku Earthquake” (Tohoku EQ). Using a web questionnaire, we surveyed whether any unusual animal behaviors were noted prior to this large EQ, and, if so, what kinds of behaviors. The survey was limited to the owners of domestic dogs and cats.

In the results, 236 of 1,259 dog owners (18.7%) and 115 of 703 cat owners (16.4%) observed behavioral changes. Most of the unusual animal behaviors occurred within one day of the EQ. In the dogs and cats, 23.3% and 25.0%, respectively, of the total number of behavioral changes appeared one or more days before the EQ. A “restless behavior” was the most common change noted in both animal species (22.5% in the dogs and 23.7% in the cats), suggesting that it is important to quantify this behavior.

Chapter 2. The longitudinal survey on the relationship between activities in animals and EQs

Based on the results of Chapter 1, we verified the relationship between the “restless behavior” and various EQs by longitudinal observation. We measured the daily activities of two cats, one horse and one turtle as an index of restless behavior using infrared sensors for one year.

In the results, the daily activities of each animal increased significantly in the week before some EQs with M_s greater than 6.0. Specifically, the activity level of one cat increased significantly within the week prior to three out of four EQs. The results of time series’ analyses indicated that the activity levels in the cats and the turtle increased significantly in the week prior to seismically active dates with effective magnitudes (M_{effs}) greater than 5.5, as theorized by Maekawa *et al.* (2006).

Chapter 3. The longitudinal survey on the relationship between the productivity of farm animals and EQs

Section 1. The changes in dairy cows' milk yields as a precursor of EQs

We focused on dairy cows' milk yields. If dairy cows responded to stimuli emerging before EQs, then the milk yields might change, because the milk yields decrease when dairy cows are stressed by various stimuli. To clarify whether the milk yields decrease prior to EQs, we verified the relationship between various EQs and the individual daily milk yields measured at three institutes of animal industry located in different regions. The observation period was approximately two years. Because the milk yields of cows vary depending on the number of days after calving and environmental conditions, such as temperature and humidity, we removed these factors affecting the milk yields before verification of the relevance to EQs.

In the results, a milking facility closest to the epicenter (340 km) showed significantly lower milk yields within three to six days before the Tohoku EQ ($P \leq 0.001$). The relationship between the milk yields and various EQs showed that the daily mean values of the milk yields in all of the institutes decreased significantly within 15 days prior to seismically active dates with M_{effs} greater than 5.0 ($M = 6.0 \pm 0.1$). In addition, the decrease in the milk yields correlated with increasing M_s .

We concluded that the dairy cow milk yields, which were measured every day in wide regions, could contribute to the ability to predict EQs.

Section 2. The changes in laying hens egg production as a precursor of EQs

In addition to the milk yields of dairy cows, the egg production of laying hens are also recorded every day in poultry farms and decrease in response to stress stimuli. If the daily egg production changes prior to EQs, then they might also contribute to the ability to predict EQs. In this section,

using the flocks' egg production rate data for three years from four poultry farms located in different regions, we verified the egg production rates' relevance to many EQs. Prior to performing the analysis, we removed known factors that affect egg production, including the hens' age and environmental factors, such as temperature and humidity, to verify the relevance to EQs.

The results of the investigation as to whether the egg production rates changed prior to the Tohoku EQ revealed that the rate on the farm closest to the epicenter (390 km) decreased significantly seven and nine days before the EQ. The results with respect to many EQs indicated that the daily mean egg production rate in all of the farms decreased significantly within 27 days prior to seismically active dates with M_{effs} greater than 5.0 ($M = 6.2 \pm 0.1$). Furthermore, the decrease in the egg production rates positively correlated with the distances from the epicenters.

Based on these results, we devised some prototype monitoring systems to predict EQs using animal behaviors. First, to allow for the unified collection of the production data in farm animals, we devised a collection system using cloud computing. Second, we focused on an activity meter that could automatically upload data on the activities of companion animals to the server. We are currently testing the applications for animals in households.

Precursors of EQs include various phenomena other than animal behaviors, such as electromagnetic anomalies and changes in radon concentrations. Some of these phenomena are being continuously monitored for EQ predictions. This study indicated that the unusual animal behaviors had a certain degree of statistical relevance to EQs; however, predictions based only on animals might result in many false alarms because there were noted behavioral changes that were irrelevant to the EQs. Therefore, the accuracy of EQ predictions might be increased by the use of varied information. We devised the following methods for EQ predictions based on the results of this study and earlier research:

- I. Forecast impending EQs with a certain degree of probability using the milk yields, the egg production rates, and the physical and chemical phenomena.
- II. Predict detailed probabilities and dates of EQs by paying more attention to precursors, such as the behavioral changes in the companion animals, when anomalies have emerged in part I.

We concluded that this system is the best possible method for predicting impending EQs utilizing the animal behaviors. Furthermore, it could forecast the EQs location based on the presence or absence of the behavioral anomalies at widely dispersed observation points, and the M of the EQ from the degree of the behavioral anomaly at each observation point. To realize this system in the future, interdisciplinary interactions between various special agencies will be necessary.

序論

人間は世界各地で地震やそれに伴う自然災害による大きな被害を受けてきた。近年では、スマトラ沖地震（2004年12月26日）、四川大地震（2008年5月12日）、ハイチ地震（2010年1月12日）、およびチリ大地震（2010年2月17日）、クライストチャーチ地震（2011年2月22日）など、世界各地において巨大地震が頻発している。「地震国」である我が国もまた、これまで実に多くの被害を受けてきた。また近い将来、フィリピン海プレートと、ユーラシアプレートとの沈み込み帯である南海トラフが引き起こす東海・東南海・南海地震の発生が危惧されている。その中でも東南海地震・南海地震に関しては、マグニチュード（M）8から9の地震が今後30年以内に70%程度の確率で発生すると想定されている（地震調査研究推進本部, 2013）。また、相模トラフに関しても、プレート沈み込みに伴うM7程度の地震の発生確率は、今後30年以内に70%程度と想定されている（地震調査研究推進本部, 2014）。

地球の表層を成す地殻と、地下にあるマントルの間にはプレートと呼ばれる板が存在し、日本列島の周辺には4枚のプレートが存在する。マントルは常に対流しており、それに伴ってプレートも移動し、プレート間には歪みが生まれる。この歪みが限界に達し、その歪みを解消する際に地震が発生すると考えられており、これはプレートテクトニクス理論と呼ばれる。地震には、大きく分けて2つの型が存在し、このような海洋プレートと大陸プレートの境界で生じる「プレート境界型地震」と、大陸プレート内の断層のずれにより生じる「プレート内地震」である。いずれにしても、地震とは地下にたまった岩盤の歪みを解消するために生じる岩盤破壊現象であると解釈することができる（日本地震学会 地震予知検討委員会, 2007）。日本には多くの活断層が存在し、太平洋側にはプレート境界が存在する。このため、日本では様々な場所を震源とする地震が生じる。また、地震自体は日本国内のどこかで毎日数十回発生しており、その全てが人的、物的被害をもたらすものではない。地震による被害の大きさは、放出されるエネルギーであるMや、地震が発生した震源地からの距離、発生した場所の深さによって異なる。

地震予知に関して、世界中でさまざまな試みがなされている。地震予知は、発生日時、発生場所、および M の全てを予測することであり、大別して、今後数十年間に地震が発生する確率を予測する長期予知、数年の間に予測する中期予知、および数ヶ月前から直前にかけて予測する短期予知に分けられる (Keilis-Borok *et al.*, 2004; Shebalin *et al.*, 2004)。現在、地震の長期的な周期性を用いて、また地殻の変動を GPS (Global Positioning System) や歪み計を用いて観測することにより、30、50、100 年以内の地震発生確率を予測する長期的予知が行われている。しかし、1995 年に発生した兵庫県南部地震以降、測地学審議会はこれまでのような前兆を頼りにした短期予報は現時点では極めて難しいと結論し、地震学の基礎的研究を重視した予知計画に変更した。さらに、2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震は確率論的長期地震予測においても危惧されていない中で発生した地震であり、これにより多くのマスメディアによって地震予知研究への批判が報じられ、現在では地震予知が不可能であることを正しく認識すべきであると指摘されている (Geller, 2011)。これに伴い公益社団法人 日本地震学会は、翌 2012 年に今後の地震学研究に対する行動計画を立案している。この行動計画の中でも、前兆現象から地震発生を直前に予測する「短期的予知」は現状では非常に困難であるとされている。

これまでに、地震発生前には様々な前兆異常現象が報告されている。これらの前兆異常現象の中には、自然環境における異常や、動植物に関する異常などがあり、人間によって直接観察されたり感じられたりする異常は総称して宏観異常現象 (Macroscopic anomaly) と呼ばれる (Whitehead and Ulusoy, 2013)。この宏観異常現象を地震予報の主な根拠の一つとして利用し、地震予報に成功した例がある。1975 年 2 月 4 日に中国で発生した海城地震 ($M = 7.3$) である。この地震による死者は 2,041 人であったが (Wang *et al.*, 2006)、翌年に発生した唐山地震 ($M = 7.5$) は予知できず、死者は 242,769 人であった (Sheng, 1987)。この海城地震では、数万人にのぼる尊い人命を守ることに成功し、宏観異常現象が地震予報の判断材料として利用できる価値を示した。しかし、宏観異常情報を利用した地震予報法は、宏観異

常の発生メカニズムが未だ科学的解明されておらず、迷信や心理学上の問題として扱われ
実用化には至っていないのが現状である。

宏観異常現象は非常に多様な現象を含むが、世界各国で報告される宏観異常現象は類似
している。1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震の後に行われた大規模なアンケート
調査では、1,519件の宏観異常現象に関する報告より算出された各宏観異常現象の割合は、
大気に関する異常が29%、大地に関する異常が11%、植物に関する異常が1%、動物に関す
る異常が50%、その他に関する異常が9%となっている（弘原海, 1995）。この数値から、動
物に関する異常が最も多いことが分かる。また、動物に関する異常の中で、人間を除く哺乳
類に関する異常は19%と最も多く報告されている。地震に先立ったこれら動物の異常行動
は、地震前兆として生じる物理・化学的刺激を感知することによるものであると考えられる。
地震発生前の自然現象の変化は、地形や応力、地電流、地熱、地下水の地中異変や電磁波、
帯電エアロゾル、ラドンの放出等、様々なものが報告されており、実際にこれらの現象に着
目した地震予知研究が数多く存在する（Wattananikorn *et al.*, 1998; Dey and Singh, 1999;
Maekawa *et al.*, 2006; Yang *et al.*, 2006; Hayakawa *et al.*, 2007）。動物はこれらの一つまたは複
数の変化を感知し反応していると考えられる。Lottら（1979）は、動物は地震の前兆として
発生する物理・化学現象を感知し、不安を感じることで地震前兆的行動を示しているかもし
れないと報告している。さらに、動物が地震発生前に生じると報告されている物理・化学現
象に対して反応しているといういくつかの比較的理論的な証拠が報告されている。具体的
には、多量の大気中の陽イオンは、動物や人間の血中セロトニン濃度を増加させると報告さ
れており（Grant *et al.*, 2011; Freund, 2013; Freund and Stolc, 2013）、大量の一酸化窒素のよう
な毒性を有するガスは無臭であり、動物を死亡させ（Singh *et al.*, 2010; Freund and Stolc, 2013）、
電磁波の一種である ULF（ultralow frequency）波や ELF（extremely low frequency）波は生理
学的影響をもたらす（Freund and Stolc, 2013; Hayakawa, 2013）と報告されている。地震予知
は物理・化学現象を機械的に監視しながら行うのが最良と考えられ、動物が反応している刺

激を特定できれば、それらを観測することができるが、地震前兆的行動の明確な発生機序はいまだ不明である。しかし、動物の地震前兆的行動はこれまでに多くの人々が報告しており、Tributsch (1982) や力武 (2001) などによって、多くの地震に関連した地震前兆的行動を含む宏観異常現象がまとめられている。

動物の前兆的行動に関する報告の多くは地震発生の 1 週間前から現れ始める (Buskirk *et al.*, 1981) ことから、実際に存在する現象なのであれば、現在研究が進められている電磁気学的異常やラドン濃度の異常などとともに、短期的に地震を予測するための一つのパラメーターになるかもしれない。地震の長期的予測は日本政府の特別機関である地震研究推進本部によって行われているものの、地震が発生する日時は不明であり、「明日」の可能性もあれば百年先まで発生しない可能性もある。そのため、観測する地震前兆現象は、手法が簡便であり、観測のシステム化が可能であるものが望ましいと考えられる。

本研究では、第一章において、2011 年 3 月 11 日に発生した非常に大規模な「東北地方太平洋沖地震」の前に、日本の一般家庭で多く飼育されている犬や猫がどの程度の割合で、いつ地震前兆的行動を示していたのか、またどのような行動が多かったのかを調査した。第二章では、第一章における調査で、地震前兆的行動として最も多く報告された「落ち着きをなくす」行動に着目し、縦断的に観測して複数の地震との関連性を検証した。第三章 第一節では、第二章の実験において、地震に先立った行動変化が数日前に現れることが確認されたため、地震前兆的行動の長期間にわたる毎日の観測がより現実的であり、長期間における多くの個体を用いた検証が可能な、搾乳牛における日々の乳量に焦点を当て、複数の地域において複数の地震との関連性を検証した。また、第二節では、乳量と同様、毎日多地点において既に記録され続けている採卵鶏の産卵率に焦点を当て、複数の地域において複数の地震との関連性を検証した。最後に総合考察として、将来の地震の直前予測に向けて実際にこれらの動物から得られる情報を毎日、多くの地域から収集し、観測できるシステムを考案し、動物の変化を利用した可能な地震予測の方法を考察した。

第一章

「東北地方太平洋沖地震」に関連した 地震前兆的行動に関する横断調査

結論

1995年に発生した「兵庫南部地震」に関連した宏観異常現象に関する調査報告では、全報告のうち50%以上が動物に関連した報告であり、そのうち犬に関連した報告が最も多く(13%)、次いでカラス(11%)、ネズミ(9%)、猫(9%)という結果になった(弘原海, 1995)。宏観異常現象を利用して地震を予測するのであれば、複数の地震において可能な限り多くの情報を収集し、その特性を分類し、日々定量化できる方法を開発することが必要である。そのうえで、利用可能な様々な種類の宏観異常現象に関する情報を統合することで精度の高い予測が可能となるかもしれない。犬や猫は日本だけでなく、世界中の一般家庭で飼育されており、他の動物種よりも母数の安定した観測や地震前兆的行動の定量化が行いやすい。犬や猫の地震前兆的行動に関する報告は、兵庫県南部地震だけでなく、1975年に中国で発生したM7.3の海城地震(Qidong *et al.*, 1981)、1988年にアルメニア共和国で発生したM6.9のスピタック地震(Nikonov, 1992)、1999年にトルコ共和国で発生したM7.4のイズミット地震(Ulsoy and Ikeya, 2008)、2009年にイタリアで発生したM6.3のラクイラ地震(Fidani, 2013)、2011年にニュージーランドで発生したM7.1のクライストチャーチ地震(Whitehead and Ulusoy, 2013)など、M6を超える複数の地震においても存在し、その多くは兵庫県南部地震の際と同様であり、犬や猫の報告は動物種の中でもっとも多くを占めている。

Rikitake (1978)の報告によれば、昆虫などの体のサイズが小さい動物が初めに地震前兆的行動を示し、地震発生前1時間前までによりサイズの大きい動物が地震前兆的行動を示したと言う。兵庫県南部地震に先行した犬と猫の地震前兆的行動に関する報告の多くは、地震発生前24時間前以内に生じていた(弘原海, 1995)。また、2009年のクライストチャーチ地震に際しても同様の報告がされている(Whitehead and Ulusoy, 2013)ことから、犬と猫は24時間以内に現れる何らかの物理・化学現象に反応している可能性がある。また、地震前兆的行動の詳細な行動について評価している研究は少ないが、Ikeya (2004)は頻繁に現れる地震前兆的行動として、犬においては「大声で吠える」、「パニックになる」、「飼い主を咬

む」などといった特徴を、猫においては「隠れる」、「悲しく鳴く」、「落ち着きをなくす」、「子猫を外へ連れ出す」、「高い木に登る」、「姿を消す」などといった特徴をそれぞれ挙げている。

聴覚に関して、犬や猫は人間よりもより高周波数の音を認識することができ、人間の可聴域周波数が 31~17,600 Hz (Heffner and Heffner, 2007) であるのに対して、犬では 67~44,000Hz、猫では 55~79,000 Hz であるといわれている (Heffner, 1998)。嗅覚においても優れており、人間の嗅細胞数は 12×10^6 個であるのに対して犬と猫は、その数十倍である (Shier *et al.*, 2004)。嗅球の細胞数に関しては、人間が $5 \sim 20 \times 10^6$ 個であるのに対して、犬では 2.8×10^8 個、猫では 6.7×10^7 個であるといわれている (Beadle, 1977; Hart, 1977)。また、人は $10^{-4.5} \sim 10^{-5.0}$ mol/L の臭気を認識できるが、犬と猫は 10^{-17} mol/l の濃度でも感知することができる (Halász, 1990; Krestel *et al.*, 1984; Passe and Walker, 1985)。このように犬や猫の感覚器における能力の閾値は人間が持つ閾値よりもはるかに優れている点が多く、人間よりも環境中の微細な音や匂いの変化を感じ取れると考えられる。また、これまでに報告されてきた地震前兆的行動の多くは、地震の発生後に行われる事後調査であるため、逸話の域を脱していない。しかし、精度の高い短期地震予知は現在も確立されていない以上、予知の可能性を有する物理学的、もしくは生物学的な情報を積極的に収集し、利活用することが科学的な姿勢であると考えられる。

これまでの地震前兆的行動に関する事後調査研究の多くは、動物だけでなく、大気や地面、電気製品に関する異常を含んだものであり、動物のみの具体的な行動に着目した研究は少ない。また、これらの多くは前兆現象があったという報告だけに着目しているため、どのくらいの動物が地震前兆的行動を示していたかを統計学的に評価することは困難である。さらに、前兆的行動を示した動物と、示すことのなかった動物の相違を明らかにすることができれば、今後、地震前兆的行動を観測するために供試する動物を選別するうえで有用な情報になると考えられる。2011年3月11日には、日本の観測史上最大の地震であるモーメント

マグニチュード (M_w) 9.0 の「東北地方太平洋沖地震」が発生した。従来の M は大規模な地震の場合、正確な規模の評価ができなくなるため M_w が用いられることが多い。本研究では、東北地方太平洋沖地震に関しては M_w により表記した。 M が 1 大きくなると、放出されるエネルギーは 31.6 倍になると考えられており (Gutenberg and Richter, 2010)、地殻に蓄積されるストレスも大きくなっていると考えられ、より多くの前兆現象が現れていた可能性がある。

第一章では、大地震に関連した地震前兆的行動を示した動物の割合を知ると同時に、地震前兆的行動として頻繁に現れる行動の種類、および地震前兆的行動の生起に関連する要因を探ることを目的とし、2011 年 3 月 11 日に発生した「東北地方太平洋沖地震」に関連した犬と猫における行動変化の有無と内容に関するアンケート調査を行った。

方法

対象地震

本調査では、地震前兆的行動が多く現れると考えられる規模の大きな地震に焦点を当て、2011年3月11日 14:46 JST に三陸沖 (38.104°N, 142.861°E) を震源として発生した Mw9.0 の「東北地方太平洋沖地震」を対象とした。この地震の震源の深さは 24 km と浅く、震源地に最も近い宮城県では気象庁震度階級で最大震度 7 が計測された。地震の型は、太平洋プレートと北アメリカプレート間の沈み込み帯、もしくはその近辺で発生した海溝型地震であった。また、この地震の 2 日前である 2011 年 3 月 9 日 11:45 JST には、Mw7.3 の前震が本震の震源地から約 50 km 離れた場所 (38.33°N, 143.28°E) で発生していた。

調査期間

調査期間は、2011 年 12 月 6 日から 2012 年 1 月 19 日までの 45 日間であった。

調査対象者

本調査では、日本で広く飼育されている動物種（犬：10,872 千頭、猫：9,743 千頭；日本ペットフード協会, 2013）であり、地震前兆的行動がこれまでに数多く報告されている犬と猫を飼育している方を対象とした。地震前兆的行動を含む地震前兆現象が現れる震源地からの距離は明確にはされていないため、居住地域は限定せず、日本全国とした。性別や年齢、飼育年数などは問わなかった。

調査方法

日本全国から可能な限り多くの回答を得るため、web を用いた電子媒体のアンケートを使用した。主に犬や猫を含むペット用の商品を販売している株式会社 アイリスオーヤマの協力を得て、アンケート調査を実施した。アンケートは、アイリスオーヤマが運営する犬と

猫の情報サイト (<http://www.iris-pet.com/>) である「アイリスペットどっとコム」ホームページ内に特設された「地震とペットに関する調査」内で行われた。

質問項目

質問項目は3つのセクションから構成された。1つ目のセクションでは、飼育者と飼育動物の環境に関する質問であり、住居形態、飼育場所、および震源地から飼育動物までのおおよその距離を算出するため郵便番号を尋ねた。住居形態に関する質問では「一戸建て」と「集合住宅」の2つの選択肢を用いた。飼育場所に関する質問では、「室内飼育」、「どちらか」というと室内飼育、「どちらか」というと屋外飼育、「屋外飼育」の4つの選択肢を用いて尋ねた。2つ目のセクションでは、飼育動物に関する質問から成り、動物種、品種、性別、年齢、および避妊・去勢の有無を尋ねた。品種は、日本で多く飼育されている犬 20 品種と、猫 7 品種の選択肢を用いた。犬の品種の選択肢は、ウェルシュ・コーギー・ペンブローク、キャバリア・キング・チャールズ・スパニエル、ゴールデン・レトリバー、シー・ズー、柴、ジャック・ラッセル・テリア、チワワ、トイ・プードル、パグ、パピヨン、ビーグル、フレンチ・ブルドッグ、ボーダー・コリー、ポメラニアン、マルチーズ、ミニチュア・シュナウザー、ミニチュア・ダックスフンド、ミニチュア・ピンシャー、ヨークシャー・テリア、ラブラドル・レトリバー、その他の犬種、および Mix であり、猫の品種の選択肢は、アビシニアン、アメリカン・ショートヘアー、スコティッシュ・フォールド、ノルウェージャン・フォレスト・キャット、ペルシャ、メインクーン、ロシアンブルー、その他の猫種、および Mix であった。3つ目のセクションでは、地震前兆的行動に関する質問から成り、地震発生前に現れた行動、その行動が現れた時間を聞いた。15 種類の行動を、犬と猫の地震前兆的行動に関する先行研究 (弘原海, 1995; Ikeya, 2004)、およびストレスや不安、恐怖に関連した情動反応 (Casey, 2002; Beaver, 2003; Beaver, 2009) を元に作成し、それぞれ

の行動が地震発生前に現れたかどうかを尋ねた。行動の選択は、複数回答を可能とした。行動の種類の詳細は Table 1 に示した。

Table 1. 使用した行動の種類

1	どこかへ逃げてしまう
2	怯えている
3	いつもより吠える (犬のみ)
4	いつもより遠吠えする (犬のみ)
5	いつもより鳴く (猫のみ)
6	落ち着きがない
7	体を小刻みに震わせる
8	身震い(水に濡れたときの行動)が多い
9	どこかに隠れる
10	普段と異なる場所にいたがる
11	食欲がない
12	下痢をする
13	嘔吐する
14	飼い主の側から離れない
15	攻撃的になった
16	その他

行動の変化が現れた場合は、選択された行動ごとに、現れ始めた先行期間を尋ねた。先行期間は、地震発生の「数秒前～数分前」、「1時間～数時間前」、「1日前」、「2～3日前」、「4～5日前」、および「6日以上前」の6種類からの単一選択形式とした。なお、回答者が複数の動物を飼育していた場合は、複数回の回答が困難であったため、飼育者と最も密接な関係を有する飼育動物についてのみ回答を求めた。また、本アンケートは、株式会社 アイリスオーヤマが行う調査と合同して実施したため、本調査で使用した質問項目の他に、飼育動物における地震発生後の行動、飼育動物との関係性、災害対策、および受けた被害についての質問が含まれていたが、本調査における解析には用いなかった。

本調査は、麻布大学ヒトゲノム・遺伝子解析研究に関する倫理審査委員会の認定(第044号)を受けて実施した。

統計解析

地震前兆的行動を示す明確な震源地からの距離に関する情報は現在存在しない。また、地震前兆的行動を引き起こす刺激も特定されてはいないが、1,243 箇所の GPS (Global Positioning System) 基地局における測位データから、「東北地方太平洋沖地震」の約 80 日前から日本全土を含む地表の変動が観測されていたと報告されている (Chen *et al.*, 2014)。したがって、本調査で得られた日本全国からの回答を全て使用して解析を行った。得られた郵便番号は、その郵便番号に該当する地域のおおよその中心部における位置情報 (緯度および経度) を求め、回答者が飼育する動物の位置から震源地までの距離を算出するために用いられた。震源地からの距離は、2 地点の緯度と経度から式 1~3 により計算した。なお、以降の震源地からの距離は全てこの方程式により算出した。また、先行研究 (Ikeya and Whitehead, 2013) に従い、距離は自然対数に変換された。

$$M = \frac{6334834}{\sqrt{\{1-0.006674 \times \sin^2(\text{latAve})\}^3}} \quad (\text{式 1})$$

$$P = \frac{6377393}{\sqrt{1-0.006674 \times \sin^2(\text{latAve})}} \quad (\text{式 2})$$

$$l = \frac{\sqrt{(M \times \Delta \text{lat})^2 + \{P \times \cos(\text{latAve}) \times \Delta \text{lon}\}^2}}{1000} \quad (\text{式 3})$$

M	・・・子午線曲率半径(m)
P	・・・卯酉線曲率半径(m)
l	・・・二つの測点間の距離(km)
latAve	・・・平均緯度 (度)
lonAve	・・・平均経度 (度)
Δlat	・・・緯度差 (度)
Δlon	・・・経度差 (度)

得られた距離と各先行期間における地震前兆的行動の有無との関連性は、ロジスティック回帰分析 (glm function; R Software version 2.15.0) によって検証した。地震前兆的行動の有無は従属変数として、対数変換された震源地からの距離は独立変数として用いた。また、地震前兆的行動の有無に関連する要因を検証するため、地震前兆的行動の有無を従属変数とし、

品種、性別、年齢、飼育場所、住居形態を独立変数として、AIC (Akaike's Information Criterion)

によるステップワイズ変数選択を用いたロジスティック回帰分析により検証した。

全ての解析は、飼育動物種別に行い、検定における有意水準は5%に設定した。

結果

回答数

回収された全ての回答は 1,976 部であった。そのうち、1 部は海外からの回答であり、13 部は明らかな信頼性の欠如、もしくは矛盾がみとめられたため、解析から除外した。したがって、有効回答数は 1,962 部（犬; 1,259 部、猫; 703 部）であった。

回答結果の基本統計

飼育動物と飼育環境に関する結果の概要は Table 2 に示した。なお、飼育場所に関する質問では、「どちらかという室内」と「どちらかという屋外」の回答数が他に比べて非常に少ない回答であったため、「どちらかという室内」は「室内」と、「どちらかという屋外」は「屋外」と統合した。回答者と震源地からの距離は、犬では 527.5 ± 7.8 km であり、猫では 498.7 ± 9.7 km であった。また、犬における最大と最小の震源地からの距離はそれぞれ、2,350 km と 140 km であり、猫における最大と最小の震源地からの距離はそれぞれ、1,950 km と 140 km であった。

Table 2 回答結果の基本統計情報 (頭数)

	犬	猫	全体		犬	猫	全体
回答数	1259	703	1962	性別			
飼育頭数				オス	665	373	1038
1頭	863	348	1211	(未去勢)	(329)	(57)	(386)
1頭以上	396	355	751	メス	589	327	916
住居形態				(未避妊)	(235)	(41)	(276)
一戸建て	911	428	1339	不明	5	3	8
集合住宅	348	275	623	年齢			
飼育環境				1歳未満	69	34	103
室内	1159	677	1836	1~3歳	372	249	621
屋外	100	26	126	4~6歳	303	144	447
				7~9歳	261	88	349
				10~12歳	163	76	239
				13~15歳	63	44	107
				16歳以上	13	46	59
				不明	15	22	37

地震前兆的行動に関する回答結果の概要

236件(18.7%)の犬と、115件(16.4%)の猫の飼育者が、15種類の行動のうち少なくとも1種類の行動が地震発生前に現れていたと回答した。そのうち、1種類のみ行動の発現を回答していたのは、犬で55件、猫で39件であり、複数の行動が現れたと回答していたのは、犬で181件、猫で76件であった。報告された地震前兆的行動の種類のうち、どちらの動物種においても「落ち着きがない」が最も多く、「食欲がない」、「下痢をする」、「嘔吐する」、および「攻撃的になった」と回答した数は少なかった(Fig. 1)。また、犬において60.0%の地震前兆的行動が、「数秒~数分前」に現れており、16.7%が「1時間~数時間前」に、7.1%が「1日前」に、7.3%が「2~3日前」に、2.6%が「4~5日前」に、6.3%が「6日以上前」に現れていた。一方、猫では44.6%の地震前兆的行動が「数秒~数分前」に現れており、30.4%が「1時間~数時間前」に、9.0%が「1日前」に、11.5%が「2~3日前」に、1.6%が「4~5日前」に、2.9%が「6日以上前」に現れていた(Fig. 2)。

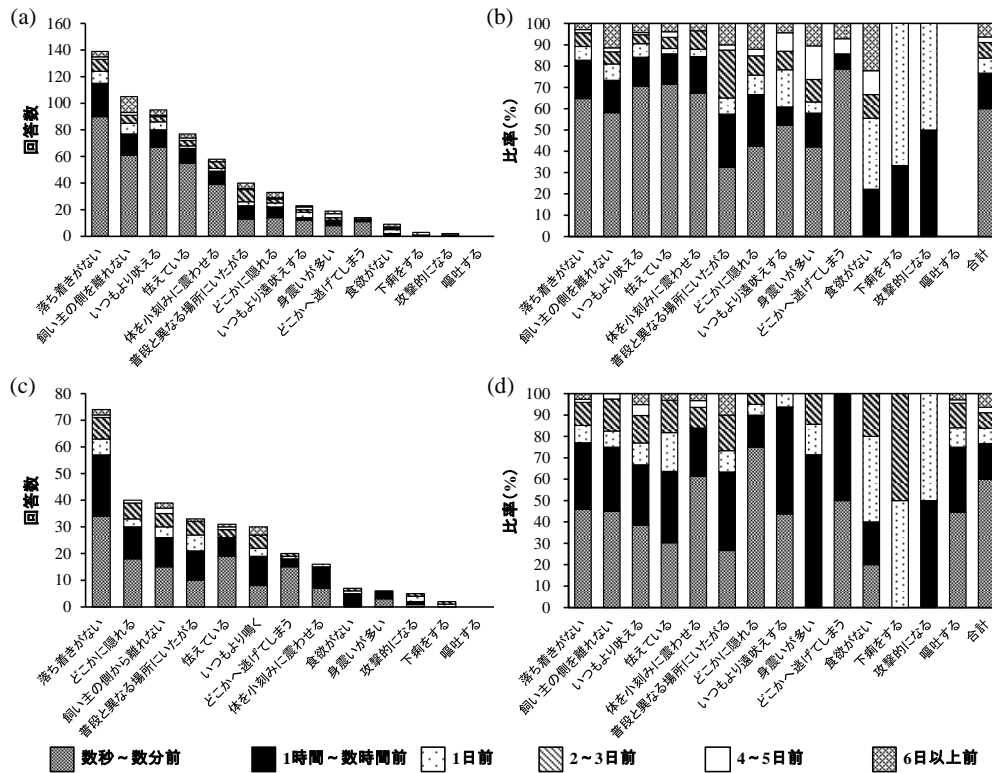


Fig. 1 (a) 犬の行動別、先行期間別地震前兆的行動の回答数; (b) 犬の各行動における先行期間の比率; (c) 猫の行動別、先行期間別地震前兆的行動の回答数; (d) 猫の各行動における先行期間の比率

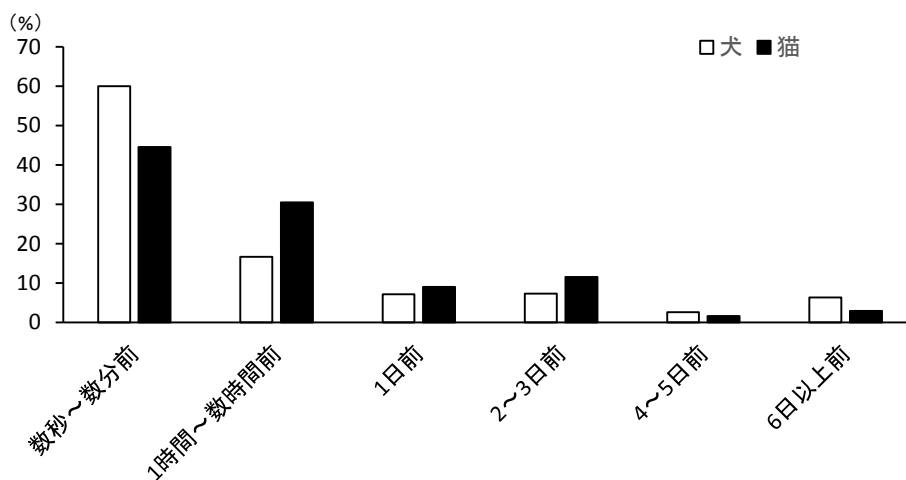


Fig. 2 犬と猫における先行期間別の地震前兆的行動報告割合

震源地からの距離と地震前兆的行動の関連性

各先行期間における、ロジスティック回帰分析の結果は Table 3 に示した。犬では、「数秒～数分前」(P<0.001)、「1時間～数時間前」(P=0.020)、および「6日以上前」(P<0.001)における地震前兆的行動は、震源地からの距離に近い方が有意に多かった。一方、猫では「2～3日前」における地震前兆的行動は、震源地からの距離の増加に伴い、有意に減少していた (Table 4)。

Table 3. 犬における各先行期間の地震前兆的行動と対数変換した震源地からの距離におけるロジスティック回帰モデル

	β coefficient	S.E.	Z value	P value	Odds ratio	95% CI	
						lower	upper
数秒～数分前							
定数項	3.434	1.105	3.109	0.002			
震源地からの距離	-2.021	0.419	-4.823	<0.001	0.149	0.067	0.326
1時間～数時間前							
定数項	1.105	1.814	0.609	0.543			
震源地からの距離	-1.605	0.688	-2.333	0.020	0.225	0.062	0.824
1日前							
定数項	2.231	2.589	0.862	0.389			
震源地からの距離	-2.335	0.994	-2.348	0.019	0.130	0.020	0.836
2～3日前							
定数項	0.357	2.657	0.134	0.893			
震源地からの距離	-1.633	1.009	-1.618	0.106	0.190	0.029	1.277
4～5日前							
定数項	-8.878	5.023	-1.767	0.077			
震源地からの距離	1.356	1.821	0.745	0.456	3.742	0.116	139.779
6日以上前							
定数項	7.172	3.049	2.352	0.019			
震源地からの距離	-4.408	1.210	-3.643	<0.001	0.014	0.001	0.128

*,95%CI は 95%信頼区間を示す

Table 4. 猫における各先行期間の地震前兆的行動と対数変換した震源地からの距離におけるロジスティック回帰モデル

	β	S.E.	Z	P	Odds ratio	95% CI	
	coefficient		value	value		lower	upper
数秒～数分前							
定数項	-0.200	1.547	-0.129	0.897			
震源地からの距離	-0.848	0.596	-1.424	0.155	0.428	0.132	1.373
1時間～数時間前							
定数項	0.514	1.828	0.281	0.779			
震源地からの距離	-1.281	0.710	-1.804	0.071	0.278	0.068	1.111
1日前							
定数項	-7.504	3.442	-2.180	0.029			
震源地からの距離	1.298	1.275	1.019	0.308	3.664	0.307	46.573
2～3日前							
定数項	3.685	3.002	1.228	0.220			
震源地からの距離	-2.974	1.208	-2.463	0.014	0.051	0.004	0.525
4～5日前							
定数項	-2.643	6.461	-0.409	0.682			
震源地からの距離	-1.082	2.507	-0.432	0.666	0.339	0.002	47.806
6日以上前							
定数項	-4.803	3.843	-1.250	0.211			
震源地からの距離	0.174	1.454	0.120	0.905	1.190	0.069	21.144

*;95%CIは95%信頼区間を示す

地震前兆的行動の有無に関連する要因

両動物種において、約半数の地震前兆的行動が「数秒～数分前」に現れており、それ以前に現れていた地震前兆的行動の数は非常に少なかったため、正確に検証することが難しいと判断し、「1時間～数時間前」、「1日前」、「2～3日前」、「4～5日前」、および「6日以上前」に現れた地震前兆的行動を統合し、「1時間以上前」に現れた地震前兆的行動に関連する要因を検証した。

犬と猫における「1時間以上前」に現れた地震前兆的行動と、品種、性別、年齢、飼育場所、および住居環境との関連性をロジスティック回帰分析により検証した。なお、猫はほと

んどの回答が Mix であったため、解析から除外した。その結果、猫における「1時間以上前」に現れた地震前兆的行動と、飼育場所において有意な関連がみられ、屋外飼育の方が、有意に地震前兆的行動が多かった (Table 5)。一方、全ての独立変数において犬における有意な関連はみられなかった。

Table 5 猫における「1時間以上前」の地震前兆的行動と関連する要因のロジスティック回帰モデル

	β coefficient	S.E.	Z value	P value	Odds ratio	95% CI lower upper	
定数項	-2.328	0.136	-17.067	< 0.001			
飼育場所 (室内 = 0)	1.230	0.593	2.072	0.038	1.962	0.559	5.361

*;95%CI は 95%信頼区間を示す

考察

本調査において、18.6%の犬の飼育者と16.6%の猫の飼育者が、飼育動物に関して「東北地方太平洋沖地震」に先行した地震前兆的行動を示していたと報告した。また、報告された地震前兆的行動のうち、最も多かった行動は犬と猫のいずれにおいても、「落ち着きがない」であった。また、「飼い主の側から離れない」は、報告された全ての行動のうち、犬で17.0%、猫で12.8%であり、どちらの動物種においても報告数が高位であった。また、猫は犬よりも「どこかに隠れる」（犬;5.3%、猫;12.8%）、および「どこかへ逃げてしまう」（犬;2.3%、猫;6.4%）の報告数が高位に位置していた。これは、猫は犬よりも3次元的に行動し、狭い場所を通過できるという行動の特徴や、形態学的な相違に起因すると考えられる。また、猫の「どこかに隠れる」という行動に着目した地震前兆的行動に関する先行研究も存在する(Liso and Fidani, 2014)。一方、「下痢をする」、「嘔吐する」、および「食欲がない」に関しては、どちらの動物種においても報告数が少ない結果となった。下痢は糞便、嘔吐は嘔吐物、食欲不振は餌の残り、これらはいずれも視覚的な証拠を残すものであり、見逃す可能性は低いと考えられることから、これらの地震前兆的行動の報告数に関する信頼性は高いと考えられる。

先行期間別の地震前兆的行動報告割合をみると、地震発生時に近づくにつれ増加していた。ニュージーランドにおいて2010年9月4日に発生したクライストチャーチ地震(M7.1)に関連した宏観異常現象を調査した先行研究においても、多くの地震前兆的行動は1時間前に生じていたと報告されている(Whitehead and Ulusoy, 2013)。本調査は、地震が発生してから数か月経過してから行ったため、飼育者は、地震前兆的行動が現れた正確な時間を記憶していない可能性があると考え、6段階に分類した先行期間を用いた。そのため、正確な比較はできないが、本調査における「東北地方太平洋沖地震」に関連した地震前兆的行動の時間分布と、クライストチャーチ地震に先行した地震前兆的行動の時間分布は類似している。

「数秒～数分前」に現れた地震前兆的行動は、P波(Primary wave)に対する反応を含んでいる可能性がある(Kirschvink, 2000)。P波は、地震動のうち、主な被害をもたらす表面

波や S 波 (secondary wave) よりも速く伝わる振動のことであり、微小な揺れであるため、人はほとんど認識できない。東北地方太平洋沖地震において、P 波は震源地に比較的近い 138 km 地点で S 波が到達する約 20 秒前に、315 km 地点では約 40 秒前に到達していたことが報告されている (Hoshiya *et al.*, 2011)。このことから、飼育者は飼育動物における P 波に対する行動変化を認識する十分な時間があったと考えられる。また、地震前兆的行動に関する質問で、「その他」の項目に自由記述した 84 人の回答者のうち、3 人は「地鳴りの前に行動変化を示した」という内容の記述をしていた。「地鳴り」とは、P 波が伝達する際に現れる可聴領域の空気振動であり (Tosi *et al.*, 2000)、これは、人間でも音響刺激として認識できる P 波が存在していたことを示唆している。

M の大きい地震では、その数日前に前震と呼ばれる地震や、群発地震が発生する場合がある。2011 年 3 月 9 日 11:45 JST には、Mw7.3 の前震が東北地方太平洋沖地震の震源地から北東に約 50 km 離れた場所で発生し、その後は 3 月 11 日 14:46 JST の本震発生時まで、M3.5 以上の地震が 56 回、M5 以上の地震が 18 回発生しており、余震活動が活発であった。また、震源地に最も近い地域では、Dobrovolsky radius condition を満たす地震が 18 回発生していた。Dobrovolsky radius condition は、Dobrovolsky ら (1979) によって提唱された、地震前兆現象が現れる震源地からの範囲を、M から予測するモデルであり、震源地からの半径 r (km) は、 $10^{0.43M}$ で定義される。主にラドン濃度の地震前兆現象としての可能性を検証する研究で使用されている (Planinic *et al.*, 2000; Walia *et al.*, 2005)。なお、3 月 9 日以前には震源地付近での群発地震は観測されなかった。したがって、3 月 9 日以降に観察された地震前兆的行動の中には、これらの前震、およびその前震による余震活動に対する恐怖反応を含んでいる可能性があり、実際に地震前兆的行動を示していた犬と猫は本調査の結果より少ないかもしれない。しかし、これらの前震のうち最も M の大きかった地震は、最初の 3 月 9 日 11:45 JST に発生した地震であったことを考慮に入れると、本震発生時刻に近づくにし

たがい地震前兆的行動の報告割合が増加した結果には、これらの群発地震は影響していなかったと考えられる。

犬において、「数秒～数分前」、「1時間～数時間前」、「1日前」、および「6日以上前」に現れた地震前兆的行動は、震源地に近づくにしたがい増加していた。一方、猫では、「2～3日前」における地震前兆的行動のみ同様の結果が得られた。複数の地震に関連した地震前兆的行動の数と震源地からの距離との間に本調査と同様の関係があったことが先行研究において報告されている (Rikitake, 2003; Whitehead *et al.*, 2004)。地震前兆的行動は、一つもしくは複数の地震に先行して生じた物理・化学的現象の変化や異常を感知したために生じる行動であると考えられる。いくつかの物理・化学的現象の異常が東北地方太平洋沖地震に先行していたことが報告されているが、これらの先行期間はさまざまであり、現れた異常が本震の発生まで継続しない現象も報告されている (Heki, 2011; Ouzounov *et al.*, 2011; Hayakawa *et al.*, 2012)。電離層における異常は多くの地震の前に報告されてきた前兆現象の一つであり (Maekawa *et al.*, 2006)、この異常は東北地方太平洋沖地震の5～6日前まで観測されていたが、それ以降は観測されなかった (Hayakawa *et al.*, 2012)。また、2011年3月8日から11日かけての4日間、強いOLR (outgoing long-wave-earth radiation) の放射異常が震源地上空、および主要な断層上で観測されていた (Ouzounov *et al.*, 2011)。このOLRの放射異常は、地殻運動の上昇に伴い発生する潜熱の流動に起因するとされ、その他の地震前にも観測されている (Ouzounov *et al.*, 2007; Pulinets and Ouzounov, 2011)。その他にも、GPSデータを用いて算出した電離層の電子密度異常は、2011年3月11日の本震が発生する約40分前から観測され、この異常は約1時間継続していたと報告されている (Heki, 2011)。本調査において、地震前兆的行動と震源地からの距離との関連性の有無は、先行期間に依存していた。地震前兆的行動が何を刺激として起きたかは不明であり、本調査からも判断はできないが、これらの物理・化学的現象の異常が出現する時間的多様性が原因となっている可能性がある。しかし、3月9日以降には明らか活発な地震活動があったため、3月9日以降、即ち「2～3日前」

以降にみられた震源地からの距離との有意な関連はこれらの前震による影響を含むかもしれない。

地震前兆的行動の生起に関連する動物の解剖学的、生理学的要因と、環境による要因の有無に関して検証するため、本調査では性別、年齢、飼育場所、住居形態との関連性に焦点を当てた。その結果、猫においてのみ飼育環境との有意な関連がみられた。本調査では、合計1,962部と比較的サンプル数の多い回答を得ることができたが、それでも地震前兆的行動を報告した回答は少なく、更に先行期間別に分けると「数秒～数分前」以外は複数の要因との関連性を検証するうえで十分なイベント発生率ではなかった。そのため、P波に対する反応を含む可能性が高く、地震の直前予測としての有用性に欠くと考えられる「数秒前～数分前」を除き、「1時間～数時間前」、「1日前」、「2～3日前」、「4～5日前」、および「6日以上前」に行動変化が現れたかどうかでまとめた、「1時間以上前」に現れた地震前兆的行動について検証を行った。その結果、行動の変化を認識しにくいと考えられる屋外飼育の猫の方が室内飼育の猫よりも地震前兆的行動の報告割合が多かった。これは、壁などの物理的な障壁によって減衰する何らかの物理・化学的現象を感知しているために生じた可能性がある。さまざまな地震前兆現象はその種類によって出現する期間にばらつきがみられることから、今後発生する地震の際に、詳細な先行期間別に解析を行えば、地震前兆的行動を引き起こす刺激を推測することができるかもしれないが、東北地方太平洋沖地震がMw9.0と歴史上5番目に大きい地震であったことを考慮すると、本調査のサンプル数をかなり上回る調査をしなければならないと考えられる。

また、本調査に限らず、このような地震前兆的行動に関する事後調査では、より大きな被害を受けた人のほうが、前兆があったと考えやすいなど、心理学的なバイアスの影響を含んでいることが指摘されている (Whitehead and Ulusoy, 2013)。また、本調査での対象者は、株式会社 アイリスオーヤマが運営する犬と猫に関する情報サイト内で行ったため、飼育する

動物について比較的高い関心を持っている飼育者に偏っていたかもしれず、地震前兆的行動の報告割合にも影響しているかもしれない。

地震前兆的行動を引き起こす可能性のある要因（刺激）はこれまでにいくつか推測されている（Grant *et al.*, 2011; Freund and Stolc, 2013; Hayakawa, 2013）。例えば、Freun and Stolc (2013) は、大気中の多量な陽イオンや、多量の有毒ガス、ULF や ELF 電磁場に反応しているかもしれないと報告している。しかし、これまでに明確な証拠は報告されていない。このような現状の下で地震前兆的行動が地震予測に対して利用可能であるかどうかを評価するためには、縦断的な行動の観測が重要であり、必要不可欠である。この縦断的観測には、客観的に評価できる数値で表すことが可能で、毎日測定することができる行動が有用であると考えられる。数値化した行動が、地震発生前に変化したという数少ない報告が存在する。Yokoi ら (2003) と Li ら (2009) は、地震発生の数日前にマウスの行動に変化が現れたと報告している。また Lott ら (1981) の報告によると、地震前兆的行動が現れた割合は、類似した震源地からの距離、震源の深さ、M の地震であっても異なるとされている。縦断的な行動の観測は、どのような地震の前に、より高い割合で、もしくはより異常度の高い地震前兆的行動を示すのかに関する評価も可能にすると考えられる。本調査では、犬と猫において落ち着きをなくすという行動が最も頻度が高く報告された。この行動を定量化し、地震との関連性を長期間に渡り評価すれば、今後の地震予測に関する研究に貢献できる可能性がある。

結論

2011年3月11日に発生した Mw9.0 の東北地方太平洋沖地震に先行した犬と猫における地震前兆的行動を調査した結果、どちらの動物種も、半数以上が地震発生の1日以内に行動変化を示していたことがわかった。また、本地震が日本での観測史上最大規模の地震であったにも関わらず、報告された地震前兆的行動の割合は、犬で18.7%、猫で16.4%という少ない数であった。しかし、本調査において、震源地に近づくに従い地震前兆的行動が増加するという関係が特定の先行期間においてみられた結果は、地震前兆的行動の地震予測への利用可能性を示し、「落ち着きをなくす」行動がどちらの動物種においても報告数が最も多かった結果は、今後の地震予測研究に役立つ情報を与えると考えられる。

第二章

動物の行動頻度と地震との関連性に関する縦断調査

緒言

第一章における調査結果から、東北地方太平洋沖地震に関連した犬と猫における地震前兆的行動として最も多い行動は、落ち着きをなくす行動であった。また、多くの地震前兆的行動は1日以内に現れていたが、1日以上前に現れていたという報告も犬において23.3%、猫において25.0%存在していた。これらから、落ち着きをなくす行動を定量化することができれば、地震前兆的行動を客観的な数値として利用できる可能性がある。地震前兆的行動を縦断的に観測し数値として捉えた例は少ないが、前兆としての報告がいくつかある (Yokoi *et al.*, 2003; Li *et al.*, 2009; Grant and Halliday, 2010)。1995年に発生した兵庫県南部地震に関して、地震の1日前にマウスの行動頻度が顕著に増加したことが報告されている (Yokoi *et al.*, 2003)。また、地震前兆的行動を引き起こす刺激が電磁波であるという仮説のもとに、犬に対して人工的に電磁波を照射した研究 (山内, 2011) では、電磁波の照射に対して行動頻度の増加した個体がみられ、その際に飼育者は飼育動物の様子を「落ち着きがなくなった」と報告していた。これらのことから、地震前兆に現れる「落ち着きをなくす」行動は「行動頻度」として定量化でき、地震の数日前から変化がみられる可能性がある。第一章では、犬と猫に関する調査を行ったが、先行研究では、亀や馬など、様々な動物種に関する地震前兆的行動も報告されている (弘原海, 1995; Chen *et al.*, 2000; Fidani, 2013)。地震前兆的行動を含めた地震前兆現象を利用して地震を予測するためには、広範囲における多地点の観測が必要になると考えられる。したがって、単一でなく、複数の動物種を対象とすれば、より効率が高まることになる。また、地震の1日前におけるマウスの行動頻度の増加を報告した先行研究では、行動頻度の観測手法としてケージ内に設置したセンサーを使用していた。この手法は、制限された空間の中で日常的に生活している動物であれば、マウス以外の動物種でも適用可能である。

第二章では、複数の動物種における行動頻度が地震の前に変化するかを調べるため、猫、馬、および亀の行動頻度を赤外線センサーによって約1年間観測し、発生した複数の大規模

な地震の数日前における行動頻度の異常値の有無を検証し、地震活動の活発な日と行動頻度の関連性を時系列解析によって検証した。

方法

対象動物

麻布大学介在動物学研究室で飼育されている猫、馬、および亀を用いた。対象動物の概要は Table 6 に示した。なお、年齢は観測開始時点のものである。

Table 6 対象動物の概要

動物種	品種	性別	年齢
猫 A	Mix	去勢オス	9
猫 B	ノルウェージャン・ フォレスト・キャット	去勢オス	3
馬	木曾馬	去勢オス	20
亀	クサガメ	未避妊メス	3

観測手法

毎日の行動頻度を計測するため、一对の赤外線センサー（PZ-51L, 株式会社キーエンス, 大阪）と電子カウンター（RC-18, 株式会社キーエンス, 大阪）を用いた。この赤外線センサーは送光部と受光部に分けられ、送光部と受光部の間を物体が通過し、赤外線が遮断された回数を電子カウンターで記録する仕組みとなっていた。なお、機器は神奈川工科大学工学部の矢田直之准教授から提供を受けた。このセンサーは、各動物が普段生活しており十分に馴化しているケージ、馬房、および水槽に設置し、普段収容されている時間帯に計測を行った。

猫 A は 2 段構造のケージ（88×57×125 cm; Fig. 3）を用いた。ケージ内には、排泄場所、水の入った皿、飼料の入った皿を置き、2 段目には毛布を敷いた。計測時間については、21 時から翌日の 8 時までであった。猫 B は 2 段構造のケージ（90×90×80 cm; Fig. 4）を用い、中に排泄場所、水を入れた皿、飼料を入れた皿、2 段目に毛布を設け、21 時から翌日の 8 時まで計測した。

馬では床面にはオガを敷いた屋内馬房(170×380×250 cm; Fig. 5)を用い、中には水と飼葉、岩塩を入れた。計測時間は17時から翌日の7時30分であった。

亀は、水槽(60×30×45 cm; Fig. 6)を用い、20×30 cmの陸地を設け、10時から翌日の10時まで計測した。また、亀は日光浴が必要であるため、陸地上部にはバスキングライトを設置し、8時から17時まで点灯させた。なお、冬眠を防ぐため水中にヒーターを設置して26℃以下にならないようにした。これらの計測は毎日行った。また、各観測場所には温度計と湿度計を設置し、計測時間内の平均温度と平均相対湿度を記録した。

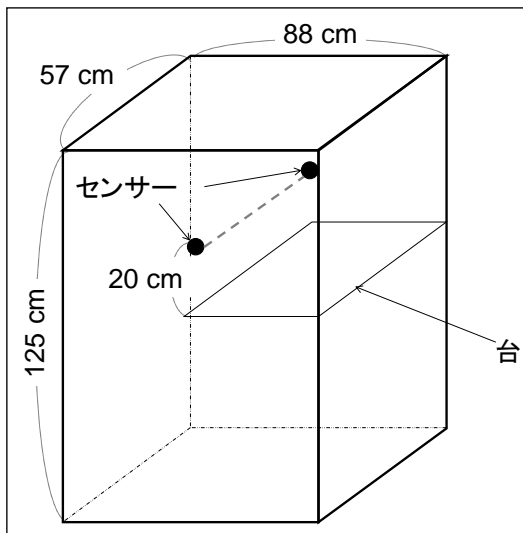


Fig. 3 猫 A の観測に用いたケージ

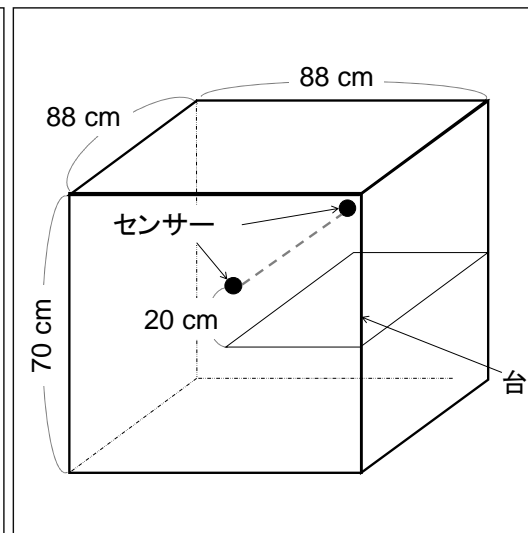


Fig. 4 猫 B の観測に用いたケージ

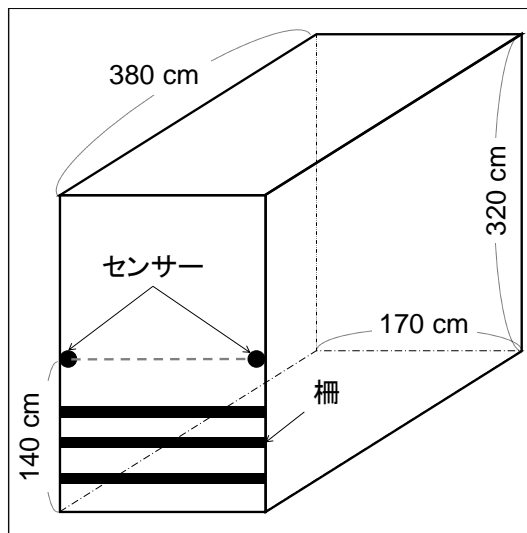


Fig. 5 馬の観測に用いた馬房

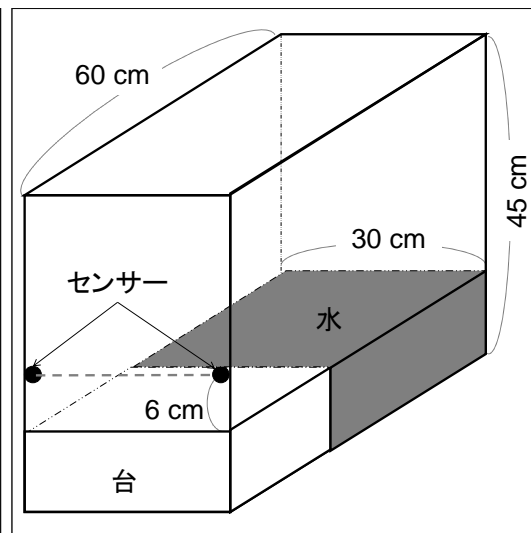


Fig. 6 亀の観測に用いた水槽

観測期間

猫 A は 2012 年 6 月 15 日から 2013 年 6 月 14 日まで、猫 B は 2013 年 7 月 8 日～2014 年 4 月 30 日まで、馬は 2013 年 1 月 9 日から 2014 年 1 月 8 日まで、亀は 2013 年 1 月 9 日から 2014 年 1 月 8 日までに観測されたデータを解析に用いた。

解析方法

行動頻度を計測した時刻は、全ての動物において日付をまたいでいた。そのため本実験では、得られた行動頻度は、計測を終了した時点における日付の行動頻度とした。毎日の計測時間はばらつきがあったため、まず初めに、24 時間当たりの行動頻度に修正し、計測時間の誤差による影響を補正した。また観測は長期間にわたって行ったため、温度や湿度による行動頻度への影響が考えられる。そのためまず、平均温度と平均湿度が行動頻度に影響するかを検証するため、ステップワイズ変数選択を用いた重回帰分析を行った。有意な独立変数がみられた動物の行動頻度は、重回帰分析で得られたモデル式に当てはめ、各日における期

待される行動頻度を求め、実測値との差を求めて変動値を求めた (式 4)。ただし、式 4 は平均温度と平均湿度の両方に有意な関連性がみられた場合のものである。

$$y' = y - (ax_1 + bx_2 + c) \quad (\text{式 4})$$

y' . . . 行動頻度変動値①

y . . . 期待される行動頻度

x_1 . . . 平均温度

x_2 . . . 平均相対湿度

a, b, c . . . 定数

得られた変動値は傾向変動が存在する可能性があり、そのようなデータに対する時系列解析は適切ではない。そこで本実験では、電離層における異常と地震との関連性を検証した先行研究 (Maekawa *et al.*, 2006; Hayakawa *et al.*, 2012) で用いられた方法を一部改変して用いた。即ち、各日の変動値から、当日の前日から 1 週間前までの変動値の平均値を引き、これを最終的な変動値として解析に用いた (式 5)。

$$y_{t0} = x_{t0} - \frac{1}{7} \sum_{t=-7}^7 x_t \quad (\text{式 5})$$

y . . . 行動頻度変動値

x . . . 行動変動値①

複数の地震前における行動頻度

まず初めに、各供試動物から得られた行動頻度が、地震の発生前に変化がみられたかどうかを調べた。地震前兆現象に関する研究では、観測値が異常であるかどうかを判断するため、標準偏差への規格化がしばしば用いられる (Yokoi *et al.*, 2003; Ouzounov *et al.*, 2011; Hayakawa *et al.*, 2012)。これは、特定の時点における観測値が平均値から標準偏差の 2 倍 ($\pm 2\sigma$) 以上

離れた場合、異常であると判断される。本調査では、前述の処理によって得られた行動頻度変化量を、各日から1ヶ月前までの観測データにおける標準偏差で規格化を行い、M6以上の地震発生前の行動頻度の変化を調べた。また、地震前兆的行動は震源地からどの程度の範囲内で生じるかは不明であるが、第一章の結果からも、震源地に近い方が地震前兆的行動は現れやすいと考えられる。そのため、第一章でも用いた Dobrovolsky radius condition の範囲内に入る地震のみを対象にした。Dobrovolsky radius condition は、Dobrovolsky ら (1979) が提唱した、前兆が現れる震源地からの距離範囲であり、M によって求めることができる。

タイムラグの推定

地震の発生と行動頻度に明確なタイムラグが存在するかを検証するために、時系列解析である相互相関関数を用いて対象地震との各タイムラグの相互相関係数を算出した。対象地震は、麻布大学が位置する神奈川県内の少なくとも一か所の震度観測点において、震度1以上を観測した地震とした。地震の震度データ、M、震源地の緯経度、震源の深さは気象庁 (<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>) により提供されるデータを利用した。また、地震との関連性が偶発的でないことを確かめるため、ランダムな日に地震が発生したと仮定して、同様に相互相関解析を行った。なお、架空の地震数は、各動物の観測期間中に観測された有感地震の数と一致するようにした。

また、地震前兆的行動はどの程度の距離範囲内で生じるかは不明である。そこで我々は、日本国内 (30.0~45.0°N, 128.0~149.0°E; Fig. 7) で発生した M3.5 以上の地震の中で、Dobrovolsky radius condition を満たす地震のみを抽出した。本実験で得られるデータは1日1回の行動頻度であるため、1日の中で複数回地震が生じた場合、タイムラグの推定が困難になる。この問題を打開するため、本実験では、Maekawa ら (2006) が考案した実効マグニチュード (Meff) を用いた。Meff は、全ての地震の M を放出エネルギーに変換し、その後日ごとに積算した後にMへと逆変換することで得られる数値で、1日当たりの地震活動量を

表すことができると考えられている。M から放出エネルギーへの変換には、Richter scale (Gutenberg and Richter, 2010) を用いた。Richter scale では、放出エネルギー (J) は式 6 で表される。

$$E = 10^{(4.8+1.5M)} \quad (\text{式 6})$$

このようにして得られた毎日の M_{eff} から、 M_{eff} が 5 以上、および 6 以上の日と行動頻度とのタイムラグを検証するため、それぞれの基準を満たす M_{eff} であった日を 1、そうでない日を 0 として、得られた 01 の時系列データと行動頻度との相互相関係数を求めた。また、Dobrovolsky radius condition の地震前兆的行動に関する研究への適用の妥当性を検証するため、この基準に関係なく、対象としたすべての地震から得られる $M_{eff}5.0$ 以上の日と、5.5 以上の日との相互相関係数も算出した。また、有感地震と同様、各 M_{eff} 以上の日と同数の架空の地震をランダムに発生させ、相互相関解析を行った。

なお、これらの相互相関係数の有意性を検証するため、各供試動物別の 95%信頼区間を求めた。95%信頼区間は、 $\pm 1.96 \times \sqrt{n}$ により求めた。

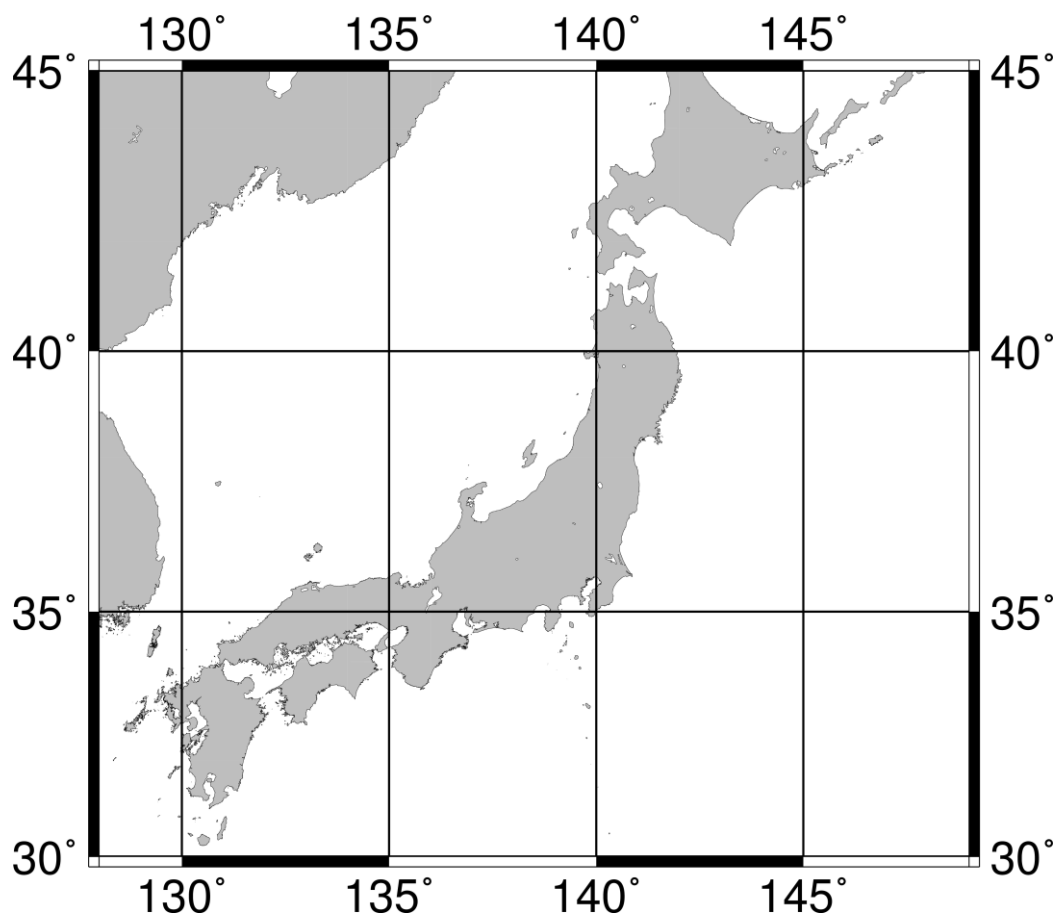


Fig. 7 Meff を算出するために使用した地震の対象範囲

結果

全観測期間中に得られた 24 時間当たりの行動頻度の平均値と標準誤差は、猫 A は 524.97 ± 18.91 回、猫 B は 513.07 ± 23.38 、馬は 84.35 ± 2.36 回、亀は 62.15 ± 1.86 回であった。欠測回数は猫 A で 2 回、猫 B で 23 回、馬で 12 回、亀で 3 回であった。平均温度と平均相対湿度との関連性を評価した結果、猫 B と亀においてのみ平均温度との関連性がみられた (Table 7)。そのため、この 2 頭に関しては、得られた偏回帰係数と切片を用いて平均温度による行動頻度への影響を除外した後に、1 日から 7 日前の行動頻度の平均値との差を求めた。その結果、最終的に得られた行動頻度変動値の平均値と標準誤差は、猫 A で -2.39 ± 19.45 回、猫 B で 6.06 ± 22.43 回、馬で -0.67 ± 2.43 回、亀で -0.17 ± 1.98 回であった。

Table 7 猫 B と亀における平均温度と行動頻度の重回帰モデル

	coefficient	S.E.	t value	p value
猫 B				
定数項	1306.23	140.47	9.30	< 0.001
平均温度	-39.11	6.83	-5.73	< 0.001
亀				
定数項	2.71	12.56	0.22	0.83
平均温度	2.32	0.51	4.58	< 0.001

複数の地震発生前の行動頻度

Dobrovolsky radius condition を満たす M6 以上の地震は、いずれかの供試動物が観測中であった期間内 (2012 年 7 月 15 日～2014 年 4 月 30 日) で、合計 8 回発生した (Table 8)。このうち、猫 A の観測期間中に 4 回発生し、猫 B では 2 回、馬と亀では 6 回発生した。それぞれの地震発生の 10 日前から当日までの、標準偏差で規格化した行動頻度は Fig. 8 に示した。なお、2013 年 4 月 13 日に発生した地震の 4 日後には条件を満たす地震が発生したため、Fig. 8 (c) のみ、14 日間のデータを示した。2012 年 12 月 7 日と 2013 年 10 月 26 日に

発生した地震では、いずれの動物でも+2 σ を超える変化はみられなかった。それ以外の地震では、いずれかの供試動物が地震発生の7日以内に+2 σ を超える変化を示していた。

Table 8 観測期間中に発生した Dobrovolsky radius condition を満たす M6 以上の地震

日付 [yyyy/mm/dd]	時刻 [hh:mm:ss]	緯度	経度	震源地から の距離(km)	深さ (km)	M	震度
2012/12/07	17:18:20	37.82	144.32	510	46	7.4	4
2012/12/07	17:31:10	37.92	143.86	480	30	6.6	2
2013/02/25	16:23:54	36.87	139.41	140	3	6.3	2
2013/04/13	05:33:18	34.42	134.83	440	15	6.3	-
2013/04/17	17:57:34	34.05	139.35	170	9	6.2	3
2013/05/18	14:47:59	37.71	141.63	310	46	6.0	2
2013/08/04	12:28:51	38.16	141.80	360	58	6.0	2
2013/10/26	02:10:18	37.20	144.57	500	56	7.1	3

*震度は神奈川県で観測された最大値を示す

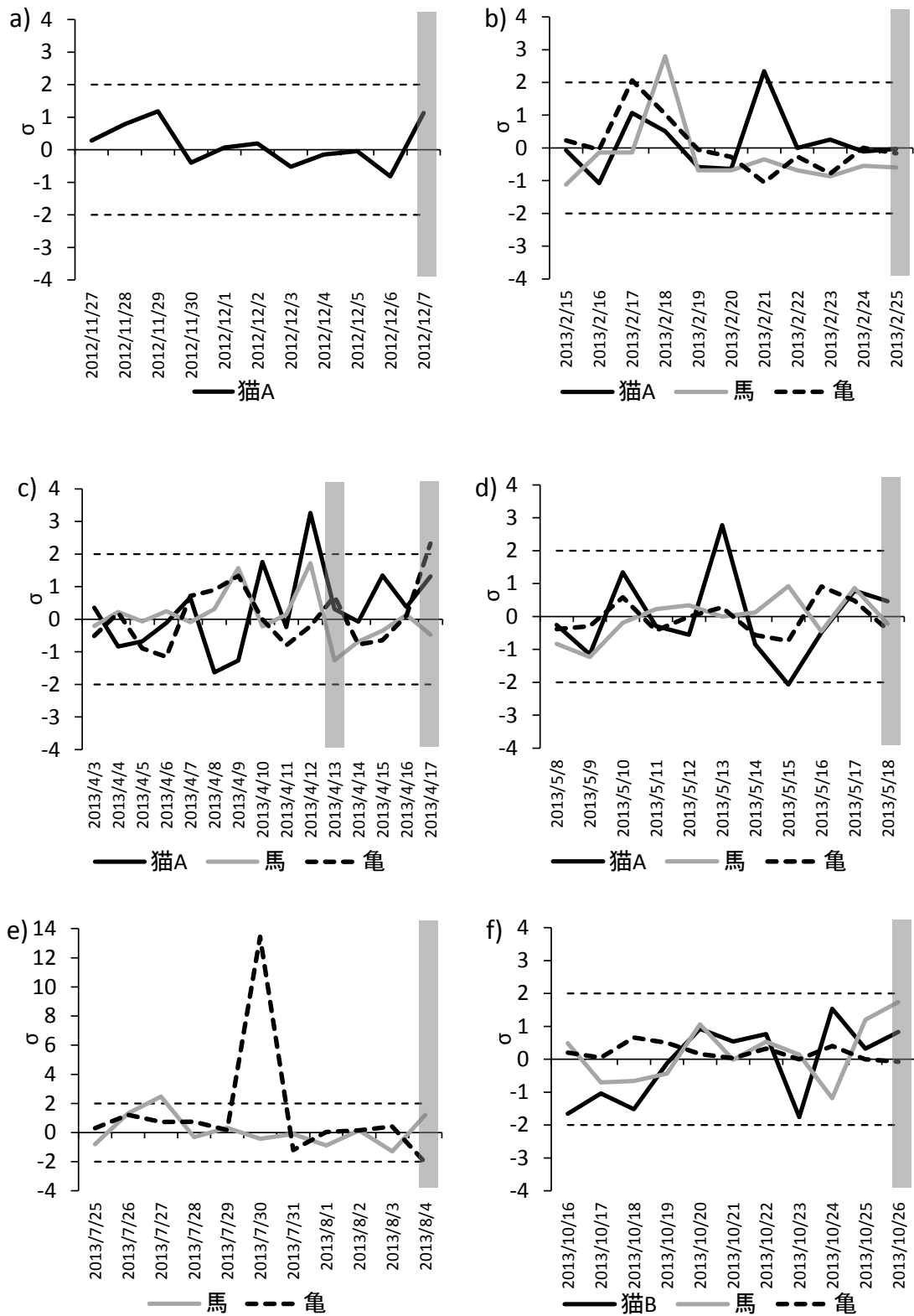


Fig. 8 Table 8 の地震発生 10 日前から地震発生当日までの各供試動物における σ で規格化された行動頻度：灰色の Box は地震発生日を示す。

タイムラグの推定

各供試動物の観測期間中に発生した有感地震回数は、猫 A で 105 回、猫 B で 75 回、馬で 101 回、亀で 101 回であった。有感地震に関する概要は Table 9 に示した。

Table9 各動物における観測期間中に発生した有感地震の概要

	有感地震 回数	M	震源地からの距離 (km)			震源の深さ (km)		
猫 A	105	4.5 ± 0.1	181.7	±	31.2	65.2	±	9.0
猫 B	75	4.2 ± 0.1	181.7	±	36.9	65.2	±	10.6
馬	101	4.4 ± 0.1	169.7	±	29.3	64.6	±	8.7
亀	101	4.4 ± 0.1	169.7	±	29.3	64.6	±	8.7

各供試動物と、有感地震とのタイムラグを相互相関係数により検証した (Fig. 9)。各供試動物における相互相関係数の 95% 信頼区間はグラフ内の破線で示した。横軸の lag については、lag0 は地震発生日と当日の行動頻度との関連性を示し、lag-1 は地震発生の 1 日前の行動頻度との関連性を、lag1 は地震発生の 1 日後の行動頻度との関連性を示している。その結果、猫 A においてのみ、有感地震の 1 日前と行動頻度に有意な正の相互相関係数がみられた。また、ランダムに発生させた架空の地震との相互相関係数に関して、馬における 8 日後を除き、有意な係数はみられなかった。

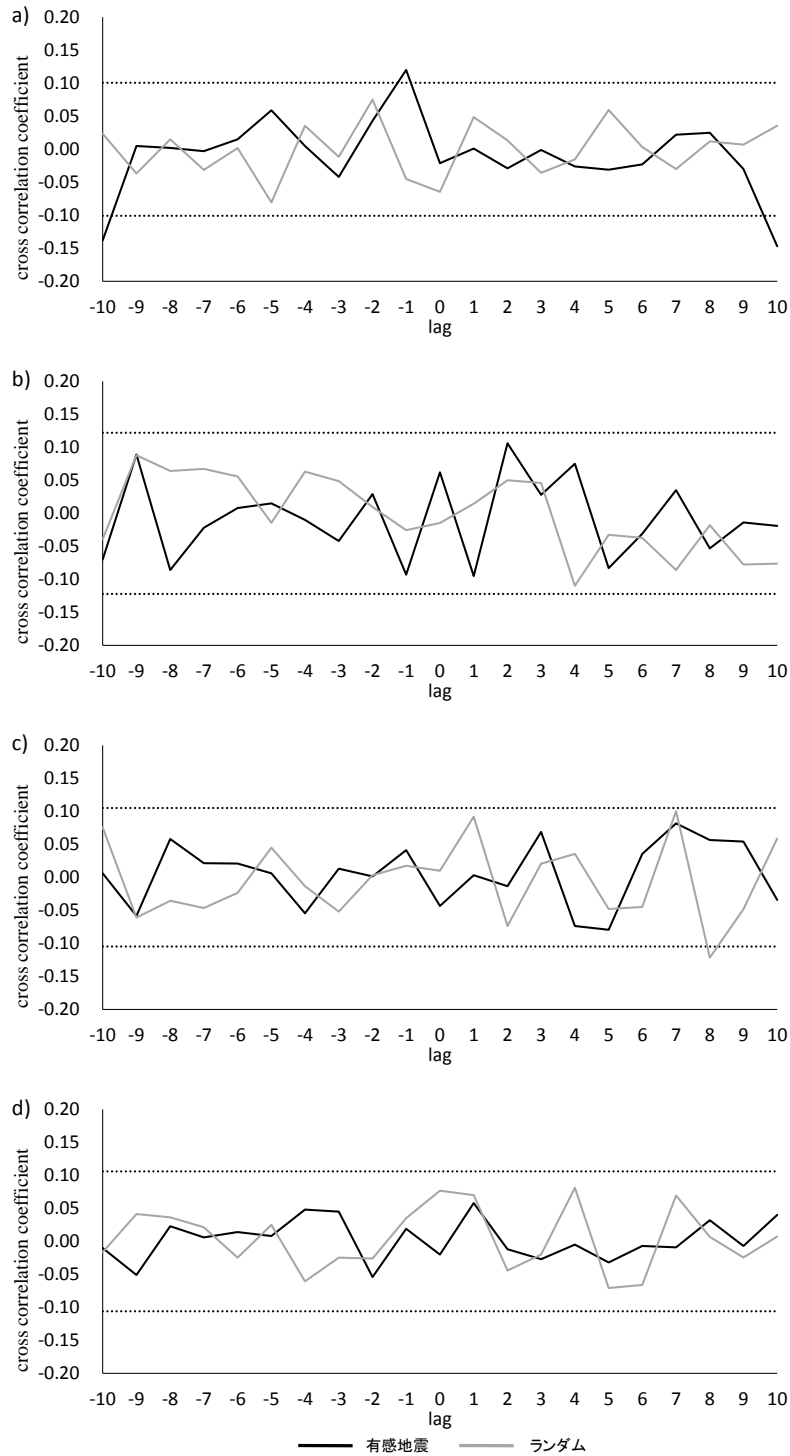


Fig. 9 有感地震と行動頻度の相互相関係数；横軸は-10日から10日までのラグ (lag) を示し、縦軸は各 lag の相互相関係数 (cross correlation coefficient) を表す。破線は 95%信頼区間を表している。a) は猫 A の、b) は猫 B の、c) は馬の、d) は亀の結果をそれぞれ示している。

次に、日本国内で発生した M3.5 以上の地震であり、麻布大学と震源地間の距離が Dobrovolsky radius condition を満たす地震のみを対象として、Meff が 5.0 以上の日、および Meff が 5.5 以上の日と行動頻度とのタイムラグを、相互相関係数を用いて検証した。また、Dobrovolsky radius condition の地震前兆的行動への適用性を検証するため、Dobrovolsky radius condition の範囲内、範囲外にかかわらず Meff が 5.0 以上の日、および 5.5 以上と行動頻度のタイムラグを、相互相関係数を用いて検証した。各条件に一致した日数は Table 10 に示した。

Table 10 各供試動物における観測期間中に Meff5.0、および 5.5 以上を記録した日数

	5.0 以上*	5.5 以上*	5.0 以上	5.5 以上
猫 A	20	12	84	24
猫 B	14	9	54	18
馬	23	16	75	26
亀	23	16	75	26

* ; Dobrovolsky radius condition を満たす地震

その結果、猫 A は Dobrovolsky radius condition を満たす地震が Meff5.5 以上の日と、6 日前の行動頻度に有意な正の相互相関係数 (0.13) がみられた (Fig. 10)。また、日本国内で発生した地震が Meff5.5 を超える日と、6 日前の行動頻度にも有意な正の相互相関係数 (0.11) がみられた。猫 B では、Dobrovolsky radius condition を満たす地震が Meff5.5 以上の日と 7 日前 (0.13)、Dobrovolsky radius condition に関わらない地震が Meff5.0 以上の日と 7 日前 (0.15)、および Dobrovolsky radius condition に関わらない地震が Meff5.5 以上の日と 7 日前 (0.12) の行動頻度に有意な正の相互相関係数がみられた。しかし、数か所の lag において、信頼区間を超える負の係数もみられ、Meff が 5.0、もしくは 5.5 以上の日の数日後の行動頻度にも有意な係数がみられた (Fig. 11)。馬では、地震発生前の lag に関しては有意な係数はみられなかった (Fig.12)。亀では、Dobrovolsky radius condition を満たす地震が Meff5.0 以上の日と 3 日前 (0.13) に有意な正の相互相関係数がみられ、Meff5.5 以上では 3 日前 (0.17) と 5 日前

(0.13) に有意な正の相互相関係数がみられた。Dobrovolsky radius condition に関わらない地震ではどちらの M_{eff} でも有意な係数はみられなかった (Fig. 13)。また、ランダムに発生させた架空の各 M_{eff} 以上の日では、いずれも有意な係数はみられなかった。

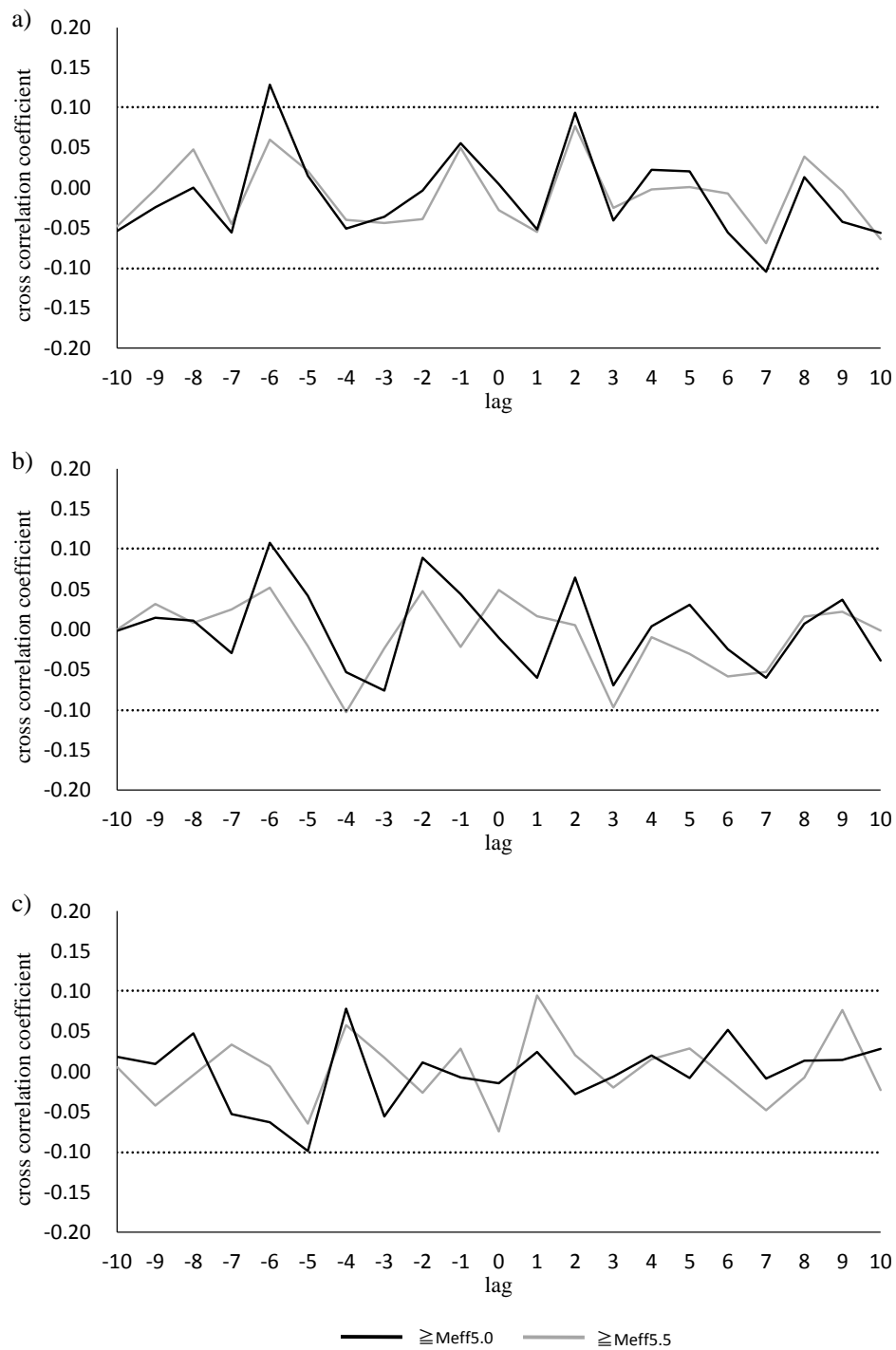


Fig. 10 猫 A における行動頻度と各条件に当てはまる地震との相互相関係数；
 a) は Dobrovolsky radius condition を満たす地震から算出した各 M_{eff} 以上の日との、b) は日本国内で発生した全ての地震から算出した各 M_{eff} 以上の日との、c) はランダムに発生させた各 M_{eff} 以上の日との結果をそれぞれ示している。

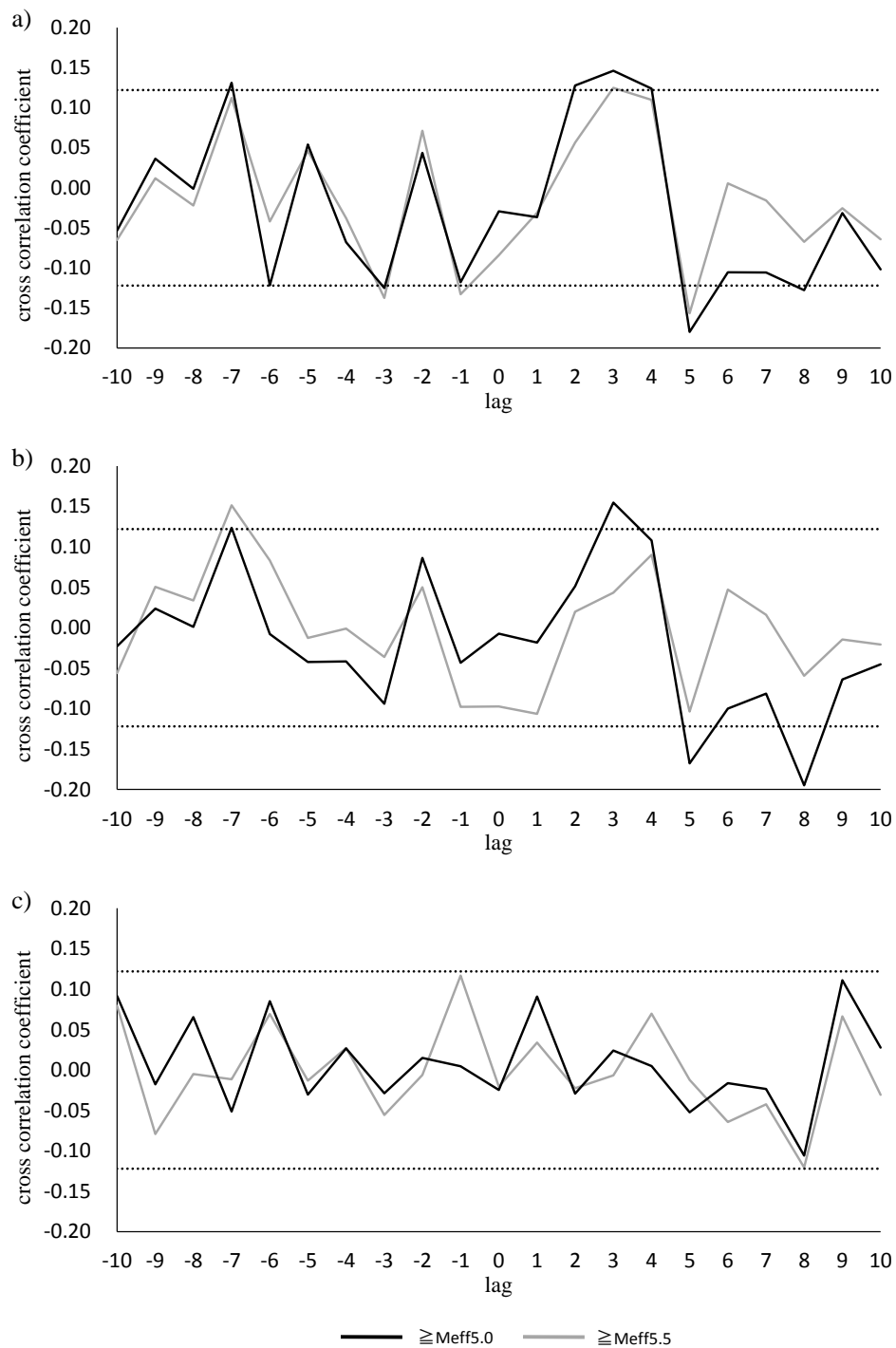


Fig. 11 猫 B における行動頻度と各条件に当てはまる地震との相互相関係数；
 a) は Dobrovolsky radius condition を満たす地震から算出した各 M_{eff} 以上の日との、b) は日本国内で発生した全ての地震から算出した各 M_{eff} 以上の日との、c) はランダムに発生させた各 M_{eff} 以上の日との結果をそれぞれ示している。

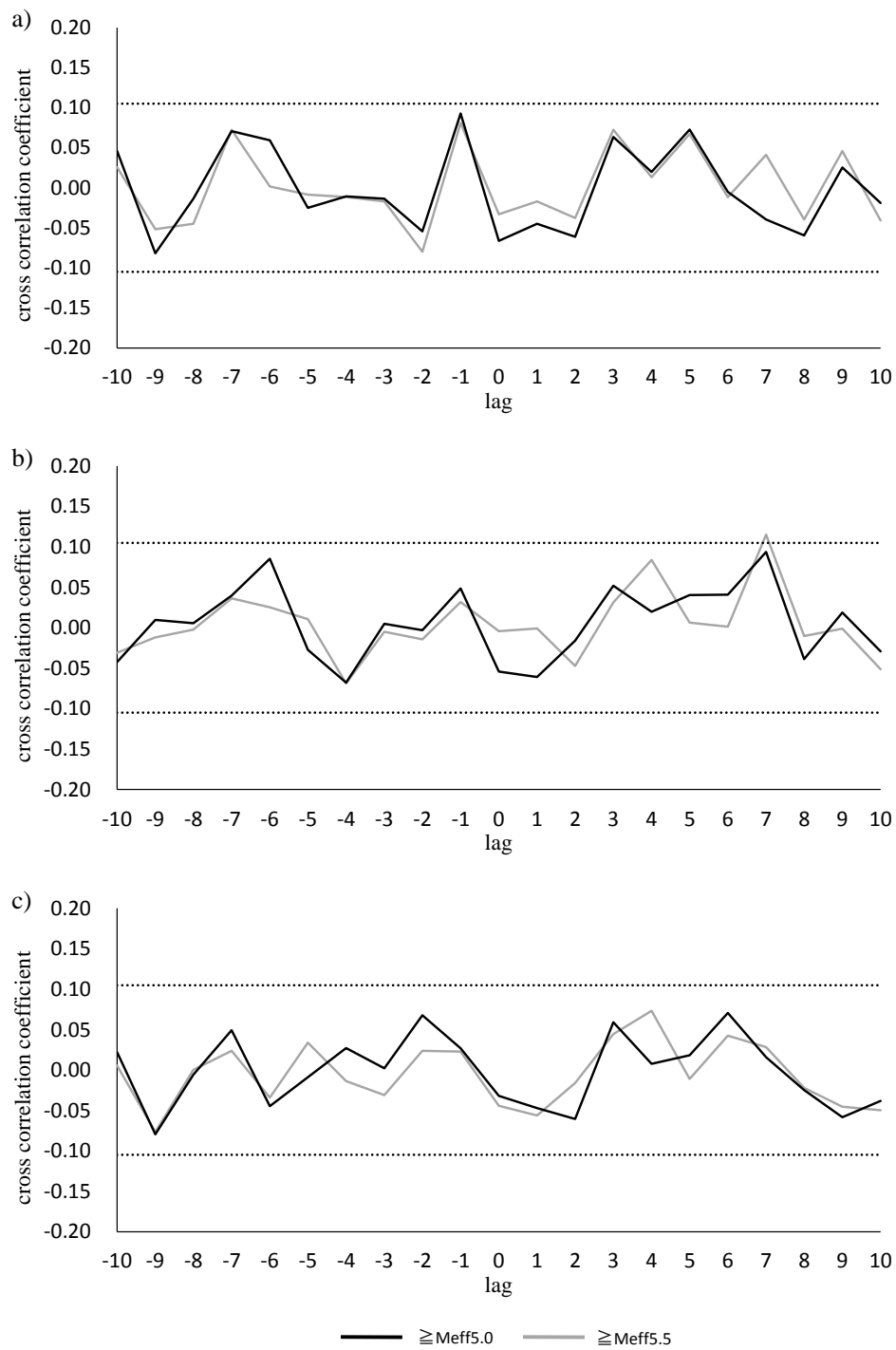


Fig. 12 馬における行動頻度と各条件に当てはまる地震との相互相関係数； a) は Dobrovolsky radius condition を満たす地震から算出した各 M_{eff} 以上の日との、 b) は日本国内で発生した全ての地震から算出した各 M_{eff} 以上の日との、 c) はランダムに発生させた各 M_{eff} 以上の日との結果をそれぞれ示している。

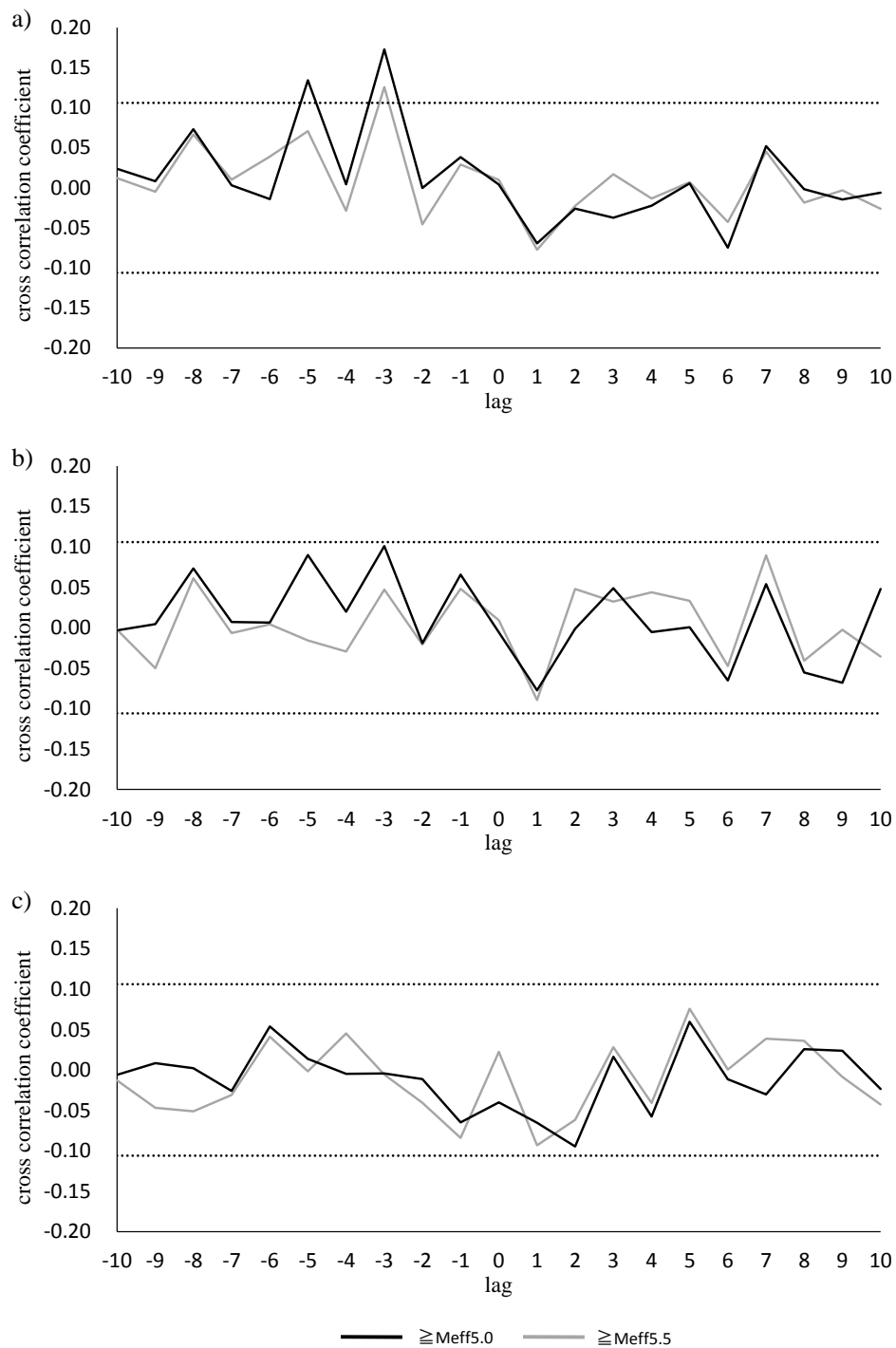


Fig. 13 亀における行動頻度と各条件に当てはまる地震との相互相関係数； a) は Dobrovolsky radius condition を満たす $M_{eff}5.0$ 以上の、b) は Dobrovolsky radius condition を満たす $M_{eff}5.5$ 以上の、c) は日本国内で発生した $M_{eff}5.0$ 以上の、d) は日本国内で発生した $M_{eff}5.5$ 以上の地震との結果をそれぞれ示している。

考察

複数の地震発生前の行動頻度

地震前兆現象には様々な種類が存在するが、 M が大きい地震のときに異常が現れやすいことが報告されている（弘原海, 1995; Maekawa *et al.*, 2006; Němec *et al.*, 2008）。また、歴史的な地震に関連して報告されてきた動物に関する異常をまとめた報告によると、地震前に現れる動物異常の報告数は、 $M5\sim6$ 以上で急激に上昇していた（弘原海, 1995）。本章では、 $M6$ 以上の地震に着目した結果、8 個の地震のうち 2 個の地震を除き、いずれかの動物が 1 週間以内に $+2\sigma$ を超える変化を示していた。この 2 個の地震は、 M は他の地震に比べて大きいものの震源地は遠かった。一般的に M が大きい方が蓄積されるストレスも大きく、前兆現象は地殻にかかるストレスが原因となって現れるという現在の理論的なモデルを考慮すると、震源地が遠かったことが、行動頻度に有意な変化が現れなかった原因として最も可能性が高いと考えられる。また、動物種によって行動頻度に変化が現れる地震や時間が異なるようにみえるが、同一個体であっても変化が現れる日は異なっており、これは地震という現象が単純で一様なプロセスを経て発生するものではないことに起因しているのかもしれない。また、2013 年 4 月 13 日と 2013 年 10 月 26 日に発生した地震は、いずれの供試動物においても観測時間内に生じた地震であった。しかし、第一章で得られた結果や、地震前兆的行動に関する事後調査を行った先行研究（Whitehead and Ulusoy, 2013）の結果では、地震前兆的行動の多くは 24 時間以内に生じるとされているが、本実験における行動頻度の増加はいずれも数日前に生じていた。第一章で対象にした地震は $Mw9.0$ と非常に規模が大きく、その他の先行研究では距離が非常に近い地域における報告が多くなっており（Whitehead *et al.*, 2004; Whitehead and Ulusoy, 2013）、このような違いが原因かもしれない。

タイムラグの推定

地震は、日本国内でほぼ毎日複数回発生しているため、前兆現象とのタイムラグを推定するためには地震を選別する必要がある。本実験では、3種類の地震カテゴリー（神奈川県における有感地震、Dobrovolsky radius condition を満たす Meff5.0 以上の地震、および Meff5.5 以上の地震）とのタイムラグを推定した。その結果、地震発生7日以内の行動頻度との有意な関連性がみられたが、供試動物によって有意な相互相関係数がみられた地震カテゴリーは異なっており、タイムラグも異なっていた。また、Dobrovolsky radius condition は、ラドン濃度の異常が現れる震源地からの距離を評価するために提唱された式であるため、地震前兆的行動にも同様に適用できるかは不明である。そのため、Dobrovolsky radius condition が地震前兆的行動にも適用できるかを調べるため、Dobrovolsky radius condition に関わらない地震を対象にして得られた Meff5.0、および 5.5 以上の地震とのタイムラグも調べた。その結果、Dobrovolsky radius condition で制限した地震とそうでない地震との各ラグにおける相互相関係数は、全ての供試動物において類似していた。また、Dobrovolsky radius condition の範囲内に入る地震の方が、有意な係数が得られた動物が多く、猫 A では Meff5.5 以上の地震の6日前に有意な係数がみられたが、Dobrovolsky radius condition で制限しない場合、6日前は同様に有意ではあるが係数が小さくなっていた。猫 B では Meff5.5 以上の地震の7日前に有意な係数がみられ、猫 A と同様に Dobrovolsky radius condition で制限しない場合は係数が小さくなった。亀では Meff5.0 以上の地震の3日前、および Meff5.5 以上の3日前と5日前に有意な係数がみられたが、Dobrovolsky radius condition で制限しない場合有意でなくなった。しかし、猫 B における Meff5.0 以上の地震についてのみ、逆の結果が得られ、Dobrovolsky radius condition の範囲に関わらない地震においてのみ7日前に有意な係数がみられた。猫 B は他の供試動物に比べ観測期間が短いため、地震の数も少なく、このような結果につながった可能性が考えられる。これらの結果から総合的に判断すると、Dobrovolsky radius condition を満たす範囲内の地震の方が、地震前兆的行動が生じやすいと考えられる。

また、馬ではいずれの地震カテゴリーでも有意な係数は得られなかった。馬と亀における観測期間は同一であり、馬は亀に比べ地震前兆的行動を示しにくい、もしくは本実験で行った観測手法では馬における地震前兆的行動を捉えられなかったと考えられる。また、Maekawaら(2006)は、電離層擾乱と地震との関連性を調べるため、電波の振幅や分散と $M_{eff}5.5$ 、および 6.0 以上の日とのタイムラグを *superimposed epoch analysis* を用いて検証した結果、 $M_{eff}6$ 以上の地震において地震発生の 1 週間以内に有意なラグがみられたと報告している。本調査では観測期間が 1 年と短く、 $M_{eff}6.0$ 以上の地震は 2012 年 6 月 15 日～2014 年 4 月 30 日までの間でも合計 9 回と少なかったため、 $M_{eff}5.0$ 、および 5.5 以上を対象とした。しかし、猫 A、猫 B、および亀において、 $M_{eff}5$ 以上よりも $M_{eff}5.5$ 以上の方が有意な係数が多く現れる、もしくは有意な係数の値が大きくなっていたことから、地震前兆的行動も電離層擾乱と同様、地震活動の活発な日、もしくは M が大きい地震の数日前に現れやすいことが示唆された。

結論

約1年間の行動頻度の観測によって、地震の数日前に行動頻度の上昇が確認され、複数の地震との関連性を検証した結果、統計的に有意な上昇がみられた。また、 M が大きい地震や、震源地からの距離が近い地震の方が、行動頻度が上昇しやすいという可能性が示された。本実験では観測期間は短く、供試した動物も限られている。また、動物から得られる情報を元に地震を予測する場合、多地点における観測が必須である。本研究で供試した猫は、2頭ともケージ内での飼育に十分慣れていたが、一般的な猫の飼育方法を考慮すると本実験で用いた手法を改良する必要があると考えられる。

第三章

産業動物における生産性と地震との関連性に関する縦断的調査

第一節

地震前兆としての搾乳牛における乳量変化に関する調査

緒言

行動頻度の観測から、地震前兆的行動は数日前に現れる可能性が示唆された。地震前兆的行動が地震の予測に利用できるかどうかを検証するためには、縦断的に動物の行動を観測し、複数の地震前に地震前兆的行動が現れたかどうかを調べる必要があると考えられる。また、地震はさまざまな場所で生じ、また M もさまざまである。したがって観測した動物がどのような地震に対して地震前兆的行動を示すのかも検証しなければならない。第二章では、猫と亀の行動頻度は、一定範囲内で生じた地震の M 、もしくは地震活動度に依存して変化する可能性が示された。しかし、この実験の観測期間は短く、より詳細に地震との関連性を検証するためにはより長期間の観測が必要である。長期間における電波伝搬異常と地震との関連性を検証した研究では、5年以上の観測データを用いており (Liu *et al.*, 2006; Maekawa *et al.*, 2006)、人工衛星により観測される電磁波強度と地震との関連性を検証した研究では、2年半以上の観測データを用いていた (Němec *et al.*, 2008)。これらの研究は、いずれも電磁気的なシグナルを測定したものである。一方、動物は日々様々な刺激にさらされるため、動物から得られる情報における日々の変動は大きく、地震との関連性を検証するにはより大きいサンプルサイズが必要と考えられる。

一方、2004年に発生したスマトラ島沖地震 ($M_w9.1$) の前には、搾乳牛の乳量に変化したといわれ、現在、スリランカでは、日々の乳量変化から地震を予知できないかという試みも行われている。搾乳牛の乳量は、様々なストレス刺激の暴露によって減少することが知られている。例えば、牛は地面の電位差に敏感に反応し、乳量が減少することが報告されており (Rigalma *et al.*, 2010)、その他にも、新奇の人によるハンドリング (Rushen *et al.*, 1999) や、新奇環境への移動や他個体との隔離 (Rushen *et al.*, 2001) によって乳量が減少することが知られている。また、牛に関する地震の前兆的行動は複数報告されている (Nikonov, 1992; Fidani, 2013)。地震前兆的行動が何らかの刺激を感知したために生ずると考えると、このようにストレス刺激に敏感な乳量にも影響を及ぼしている可能性がある。

近年、酪農家が減少していく一方で、牧場当たりの飼養頭数は増加している（農林水産省大臣官房統計部生産流通消費統計課, 2013）。それに伴って、搾乳作業や飼育管理を効率的に行うための道具の開発が進んでいる。その中の一つとして、大規模農場や、各地方の畜産試験場では搾乳作業の自動化が進み、電子乳量計により測定された毎回の搾乳成績が有線、または無線経由で牧場内のコンピューターへ自動転送され、保管されるシステムを導入しているケースが多い。この機械によって個体別の乳量変動を簡便に評価することができるため、地震との関連性が発見されれば、一つの地震予測に対するパラメーターになると考えられる。また、既にこのようなシステムを導入している牧場のデータを用いれば、長期間にわたる多くの個体の乳量と地震との関連性を検証することが可能である。

本節では、地震前における搾乳牛の乳量が変化するか、また変化する場合、どのような地震の前により顕著に変化するかを明らかにするため、異なる地域に位置する複数の牧場を対象として、約 2 年間にわたる電子乳量計により測定された日々の個体別乳量データを用い、東北地方太平洋沖地震に先行した乳量変動の有無、地震活動の活発な日と乳量変動のタイムラグ、および乳量変動と地震の特徴（M、震源地からの距離、および震源の深さ）との関連性を検証した。

方法

対象動物と対象施設

茨城県つくば市に位置する独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構 (36.023°N, 140.119°E ; 施設 A)、神奈川県海老名市に位置する神奈川県農業技術センター畜産技術所 (35.352°N, 138.577°E ; 施設 B)、および静岡県富士宮市に位置する静岡県畜産技術研究所 (35.416°N, 139.405°E ; 施設 C) の計 3 施設の協力を得て、各施設で飼育されるホルスタイン種の搾乳牛における日々の乳量データを用いた。なお、乳量に影響を及ぼす可能性のある試験等に用いられた動物のデータは本研究から除外した。調査に用いた対象動物の概要は Table 11 に、飼養管理方法は Table 12 に示した。施設 A ではスタンションで飼育し、日中は放牧していた。施設 B ではフリーストールで飼育し、日中は放牧していた。施設 C では泌乳初期のみタイストールで飼育し、以降の泌乳期間中はフリーストールで飼育していた。搾乳作業はすべての施設間でほぼ同様であり、搾乳牛は 1 日 2 回ミルクパーラーへ誘導され、ミルクパーラーにより搾乳された。ミルクパーラーには電子ミルクメーターが付属しており、測定された毎回の乳量はパーラー内のコンピューターに自動転送され、保管されるシステムになっていた。

対象期間

2011 年 1 月 1 日～2013 年 3 月 31 日までの乳量データを対象とした。

Table11 各施設における対象動物の概要

No.	品種	頭数	乳期数	搾乳頭数/日			分娩時年齢		
				(Mean	±	S.E.)	(Mean	±	S.E.)
A	ホルスタイン	55	87	25.7	±	3.4	3.5	±	1.3
B	ホルスタイン	39	56	20.6	±	5.4	3.3	±	1.2
C	ホルスタイン	70	113	38.2	±	6.3	4.2	±	1.8
合計		164	256	82.9	±	10.7	3.8	±	1.5

Table 12 各施設における飼養管理方法の概要

施設 No.	飼養法	搾乳時間	
		午前	午後
A	スタンション + 放牧	8:30	18:30
B	フリーストール + 放牧	8:30	16:30
C	フリーストール、タイストール	9:00	18:00

解析方法

搾乳牛は、分娩後まもなく泌乳が始まり、分娩後4～8週間は乳量が増加し、その後徐々に減少して約40週後に泌乳期が終了し、乾乳期に入る。そのため乳量は分娩後経過日数によって大きく異なることが知られている。そのため、地震に先行する乳量の変化の有無を調べるためには、分娩後経過日数による影響を除外する必要がある。搾乳牛における暑熱ストレスと乳量の関連性を検証した研究において、泌乳曲線式を求めて期待乳量を算出し、実際に測定された乳量との差を求めることで分娩後経過日数による影響を除去した後に環境温度との関連性を検証したという報告がある(戸田ら, 2002)。本研究では、この戸田ら(2002)の方法を一部改変して分娩後経過日数が乳量に与える影響を除去した。まず、各施設における乳量データを用いて、Wood(1967)の泌乳曲線式(式7)に当てはめ、個体別に泌乳曲線を算出した。なお、試験期間中に2回以上の泌乳期を迎えた牛がいたため、泌乳曲線の算出は1乳期ごとに行った。

$$y_t = a \times n_t^b \times e^{-cn_t} \quad (\text{式 7})$$

y_t . . . 分娩後 t 日目の乳量

n . . . 分娩後経過日数

a, b, c . . . 定数

e . . . ネイピア定数

泌乳曲線式への当てはめは一般線形モデル (glm function; R software version 2.15.0) を用いて行い、分娩日を 0 とした分娩後経過日数を従属変数とした。求めた泌乳曲線式から各日における期待乳量を算出し、期待乳量から同日に測定された実乳量を差し引くことで分娩後経過日数による影響を除去した乳量変動値①を求めた (式 8)。

$$\text{乳量変動値①} = \text{実乳量} - \text{期待乳量} \quad (\text{式 8})$$

また、搾乳牛は環境温度や相対湿度が上昇することによって暑熱ストレスを受け、乳量が低下することが知られている。環境温度と相対湿度による暑熱ストレスの指標には THI (Thermal Humidity Index) が多く用いられ、THI が 72 を超えると乳量は線型的減少を示すことが報告されている (West *et al.*, 2003)。また、このような関係は、暑熱ストレスによる摂食量の低下に起因すると考えられ、THI の上昇と乳量の減少には時間的なラグが存在することが報告されており、West ら (2003) は、THI は 2 日前の乳量と最も適合度の高い関係を示すことを発見した。地震との関連性を検証するためには、このような暑熱ストレスによる影響をあらかじめ除去する必要があると考えられる。THI の算出には、各施設に最も近い気象観測点において観察された 1 日当たりの平均温度と平均相対湿度を用いた。THI を算出するための公式は複数存在するが、本研究では頻繁に使用されている National Oceanic and Atmospheric Administration (1976) の THI 算出公式を用いた (式 9)。

$$THI_t = (1.8 T_t + 32) - (5.5 + 0.055 H_t)(1.8 T_t - 26) \quad (\text{式 9})$$

T . . . 摂氏温度

H . . . 相対湿度

平均温度と平均相対湿度の解析期間中におけるデータは気象庁ホームページ (<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>) から入手した。対象とした搾乳牛は牛舎内で飼育される時間が長いので、牛舎内の THI に強い影響を受けていると考えられる。したがって外気の THI が 72 を超えても暑熱ストレスを受けていない可能性があるため、本研究では各施設における THI と乳量の関連性を検証した。乳量を減少させる THI の臨界点、および臨界点以上の THI と 2 日後の乳量との関連性を推測するため、Vitali ら (2009) と戸田ら (2002) の方法を一部改変し、折れ線回帰モデルを用いて式 10 の各係数を推測した。

$$\begin{cases} y_t = a + b x_{t-2} & (x \geq x_0) \\ y_t = c & (x < x_0) \end{cases} \quad (\text{式 10})$$

y_t . . . 時点 t における乳量

a, b, c . . . 定数

x . . . THI

x_0 . . . 臨界 THI

推測されたモデルから、各日における期待乳量を算出し、乳量変動値①から引くことによって乳量変動値②を求めた (式 11)。

$$\text{乳量変動値②} = \text{乳量変動値①} - \text{期待乳量} \quad (\text{式 11})$$

分娩後経過日数と暑熱ストレスによる影響を除去した乳量変動値には、わずかな傾向変動が残っている可能性がある。傾向変動が残っている場合、時系列解析への適用はふさわし

くないため、Maekawa ら (2006) の方法を一部改変し、各日の 1~7 日前までに測定された乳量変動値②の平均値から、各日に測定された乳量変動値を引くことで、傾向変動を除去した。式は第二章の式 5 と同様である。これを最終的な乳量変動値として地震との関連性の検証に用いた。

地震との関連性の検証

「東北地方太平洋沖地震」に先行した乳量変動の有無の検証

まず、2011 年 3 月 11 日 14:46 JST に三陸沖を震源として発生したモーメントマグニチュード (Mw) 9.0 の「東北地方太平洋沖地震」に先行した乳量の変化の有無を検証した。各施設と震源地との位置関係は Fig. 14 に示した。2011 年 1 月 1 日~2011 年 3 月 11 日までのデータを用いて検証を行った。施設ごとに 2011 年 1 月 1 日から 2011 年 1 月 31 日までの 1 ヶ月間の乳量を基準値 (Basal period) として用い、2011 年 2 月 1 日から 2011 年 3 月 11 日までの乳量との差、および施設間の差を、repeated measures two-way ANOVA とボンフェローニ補正を用いた多重比較検定により検証した。施設と日時間に有意な交互作用がみられた場合は、repeated measures one-way ANOVA とボンフェローニ補正を用いた多重比較検定により Basal period と各日間の差を検証した。

次に、施設から震源地までの距離と乳量変動値に関連があるかどうかを調べるため、2011 年 2 月 1 日から 2011 年 3 月 11 日までの 1 日ごとに、距離を従属変数、乳量を独立変数として単回帰分析を行った。

また、地震発生前に乳量変動する場合、変動の程度に関連する要因があるかもしれない。本調査では、搾乳牛の年齢と乳量変動の間に関連があるかどうかを調べるため、乳量を従属変数、各個体の年齢を独立変数とした単回帰分析を行った。

タイムラグの検証

地震の発生と乳量の変動に明確なタイムラグが存在するかを検証するために、時系列解析である相互相関関数 (ccf function; R Software version 2.15.0) を用いて対象地震との各タイムラグの相互相関係数を算出した。対象地震は、各施設が位置する都道府県内の少なくとも一箇所の震度観測点において、震度 1 以上を観測した地震とした。なお、2011 年 3 月～4 月は M5 を超える、東北地方太平洋沖地震に伴う余震とそれに伴う誘発地震がほぼ毎日発生していたため、解析対象期間は 2011 年 5 月 1 日以降とした。地震の震度データ、M、震源地の緯経度、深さは気象庁 (<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>) により提供されるデータを利用した。次に、日本国内で発生した M3.5 以上の地震であり、各施設と震源地間の距離が Dobrovolsky radius condition を満たす地震のみを対象として、日単位で実効マグニチュード (Meff) を算出した。Meff が 5.0 以上の日、5.5 以上の日、6.0 以上の日、6.5 以上の日と乳量とのタイムラグを検証するため、各 Meff の条件に一致する日を 1、そうでない日を 0 とし、相互相関解析により検証した。また、3 箇所の施設から得られた乳量変動値の平均値と、全ての施設において Meff5.0 以上、Meff5.5 以上、Meff6.0 以上、および Meff6.5 以上が観測された日との相互相関係数も算出した。また、全ての相互相関解析は、地震との関連性が偶発的でないことを確かめるため、第二章と同様、ランダムに発生させた架空の地震、もしくは架空の各 Meff 以上の日を対象とした解析も行った。Dobrovolsky radius condition と Meff に関する詳細は、第二章に記載した。

地震の M、震源地からの距離、および深さと乳量変動値の関連性

乳量に変化をもたらす M、震源地からの距離、および深さの閾値を推定するため、2011 年 5 月 1 日～2013 年 3 月 31 日に、日本国内 (30.0～45.0°N, 128.0～149.0°E; Fig. 7) で発生した M3.5 以上の地震を対象として、ステップワイズ変数選択を用いた重回帰分析を用いて検証した。各施設の乳量変動値の平均値を従属変数とし、M、震源地からの距離、および震

源の深さは独立変数として用いた。また、**M**、震源地からの距離、および震源の深さとの関連は、それぞれの変数が一定以上、もしくは一定以下になった時に現れる可能性が考えられたため、全ての独立変数は2次まで用意し、多項回帰モデルとして検証した。

すべての統計解析における有意水準は $P \leq 0.05$ とした。

結果

「東北地方太平洋沖地震」に先行した乳量変動の有無の検証

東北地方太平洋沖地震の震源地から各施設までの距離と、各施設が位置する都道府県内の震度観測点で計測された最も大きい震度は Fig. 14 に示した。Fig. 14 は The Generic Mapping Tools により正距方位図法を用いて作成し、以降の地図も同じ方法によって作成した。

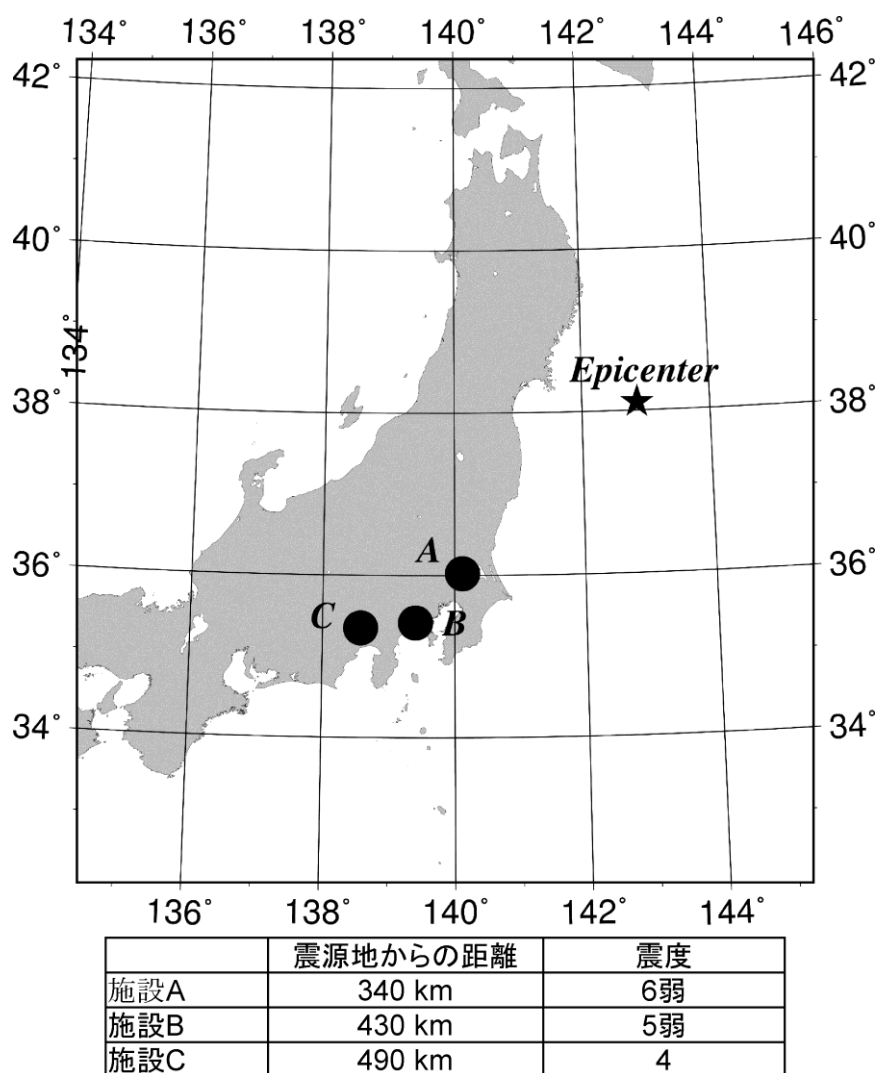


Fig. 14 「東北地方太平洋沖地震」の震源地を示した地図；黒丸は各搾乳施設の位置を示す；下表は各施設と震源地までの距離と、各施設が位置する都道府県内の地震計で観測された最大震度を示す

Table 13 は、2011 年 2 月 11 日から 2011 年 3 月 11 日 14:46 までに、少なくとも 1 箇所の施設で Dobrovolsky radius 内に入った地震のリストを示した。

Table 13 2011 年 2 月 1 日から 2011 年 3 月 11 日 14:46 までに、いずれかの施設で Dobrovolsky radius condition を満たす範囲内で発生した地震のリスト

日付 [yyyy/mm/dd]	時刻 [hh:mm]	緯度	経度	震源地からの距離 (km)			Dobrovolsky radius (km)	震源の 深さ (km)	M
				施設 A	施設 B	施設 C			
2011/02/05	10:56	34.86	140.62	140	130	190	170	641	5.2
2011/02/10	22:03	37.16	141.41	170	260	320	210	48	5.4
2011/02/24	14:36	36.30	140.02	30	110	170	40	73	3.6
2011/02/26	04:12	34.44	140.37	180	140	190	140	56	5.0
2011/02/27	02:18	36.16	137.46	240	190	140	140	4	5.0
2011/02/27	05:38	36.16	137.45	240	200	140	230	4	5.5
2011/03/07	15:13	35.68	139.28	90	30	70	40	140	3.8
2011/03/09	11:45	38.33	143.28	380	470	530	1380	8	7.3
2011/03/09	11:57	38.32	143.40	390	480	540	460	12	6.2
2011/03/09	11:58	38.30	143.16	370	460	520	380	21	6.0
2011/03/09	13:36	38.61	143.25	400	490	550	420	11	6.1
2011/03/10	03:16	38.27	142.88	350	440	500	570	29	6.4
2011/03/10	03:44	38.48	143.43	400	490	560	510	36	6.3
2011/03/10	06:22	38.13	143.22	360	460	520	510	18	6.3
2011/03/10	06:23	38.17	143.04	350	450	510	840	9	6.8
2011/03/11	14:46	38.10	142.86	430	340	490	7410	24	9.0

解析に使用した乳量変動値はすべての施設において正規分布を示し、分散は施設 A で 0.621、施設 B で 0.639、施設 C で 0.601 であった。統計解析の結果、乳量は日間で有意に変動したが (repeated measures two-way ANOVA, $F = 1.730$, $P = 0.003$)、施設間での有意な主効果はみられなかった。また、日時と施設間に有意な交互作用がみられた ($F = 1.778$, $P < 0.001$)。各施設において repeated measures one-way ANOVA を用いた結果、施設 A のみ日間に有意な主効果がみられた ($F = 8.875$, $P < 0.001$)。施設 A において多重比較検定を行った結果、2 月

10日 ($P < 0.001$)、3月5日 ($P < 0.001$)、3月6日 ($P < 0.001$)、3月7日 ($P < 0.001$)、3月8日 ($P = 0.001$)における乳量は Basal period と比較して有意に減少していた (Fig. 15)。

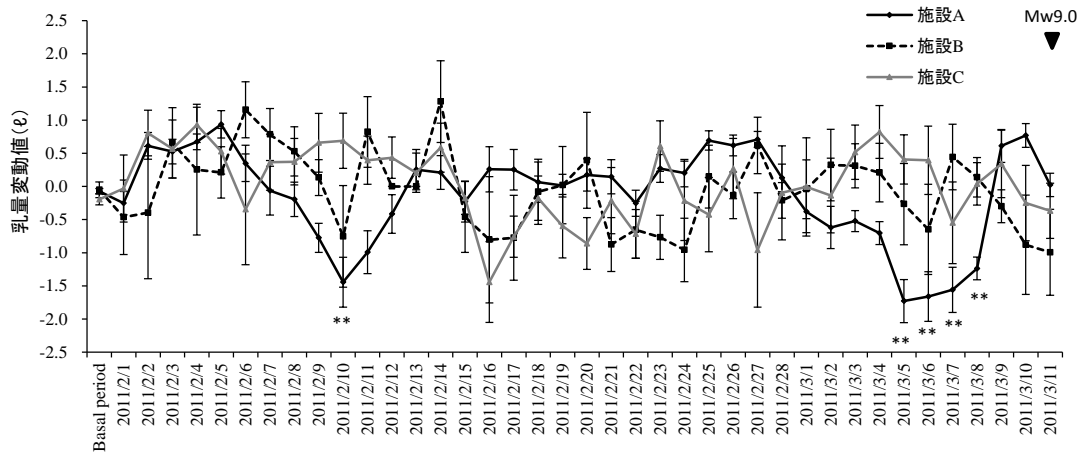


Fig. 15 各施設における Basal period と各日の乳量変動値；▼は地震発生日を示す；**は $p < 0.01$ を示す

次に、震源地からの距離と乳量変動値の関連性を検証するため回帰分析を行った結果、2011年2月9日 ($t = 2.66, P < 0.01$)、2月10日 ($t = 3.10, P < 0.01$)、2月11日 ($t = 2.42, P = 0.02$)、3月3日 ($t = 2.07, P = 0.04$)、3月4日 ($t = 2.497, P < 0.01$)、3月5日 ($t = 3.75, P < 0.001$)、3月6日 ($t = 2.84, P < 0.01$)、3月8日 ($t = 3.05, P < 0.01$) において距離に近いほど乳量が減少していた。Fig. 16 は、有意な係数が得られた日にそれぞれの係数を示した。

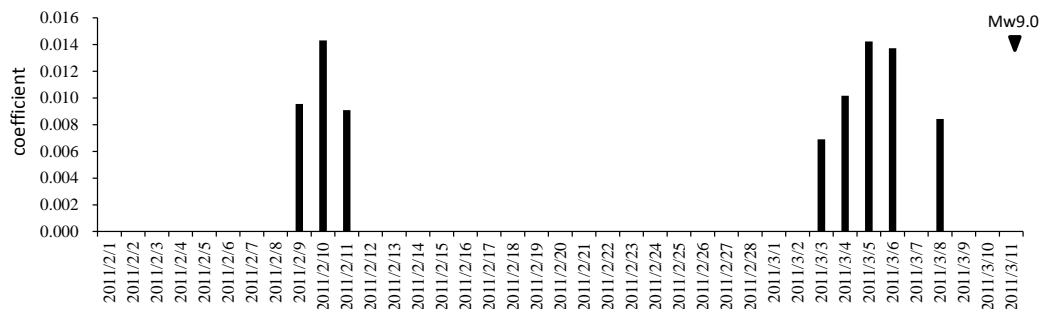


Fig. 16 各日における乳量変動値と震源地からの距離の関連性；棒グラフがない日は有意な関連性がなかったことを意味する

次に、年齢と地震発生前にみられた乳量変動との間の関連性の有無を検証するため、施設 A で連続した有意な減少が観察された 2011 年 3 月 5 日から 2011 年 3 月 8 日の 4 日間の各個体の乳量変動値の平均値と年齢に関し、回帰分析を行った。その結果、年齢が高くなるにつれ乳量が減少しており、有意な回帰係数が得られた ($t = 2.99, P < 0.01$; Fig. 17-a)。一方、同様に施設 B と施設 C でも解析を行ったが、有意な関連はみられなかった (Fig. 17-b; Fig. 17-c)。

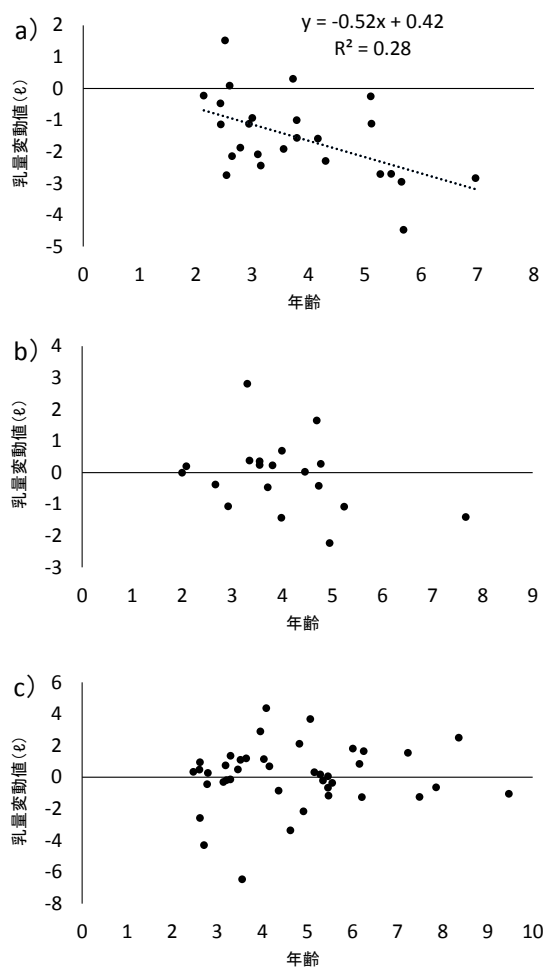


Fig. 17 a) 施設 A における乳牛の年齢と、3 月 5 日から 3 月 8 日までの乳量変動値の平均値を示す散布図 破線は回帰直線を示す ; b) 施設 B 乳牛の年齢と、3 月 5 日から 3 月 8 日までの乳量変動値の平均値を示す散布図 ; c) 施設 C における乳牛の年齢と、3 月 5 日から 3 月 8 日までの乳量変動値の平均値を示す散布図

タイムラグの推定

施設 B と施設 C における有感地震と乳量の関連性を、相互相関解析を用いて検証した結果、Fig. 18 に示す相互相関係数が得られた。期間中に発生した有感地震の概要は Table 14 に示した。施設 A は期間中、ほぼ毎日有感地震が発生していたため、本解析からは除外した。なお、データは 2011 年 5 月 1 日から 2013 年 3 月 31 日までの乳量である。横軸の lag0 は、有感地震と地震当日の乳量との関連性を、lag1 は地震 1 日後の乳量との関連性を、lag-1 は地震 1 日前の乳量との関連性を示している。各施設における係数の信頼区間はグラフ内の破線で示した。施設 C は、有感地震の 2 日前に有意な負の係数を示した。施設 B では有意な係数はみられなかったが、施設 C と同様、lag-2 において係数が低かった。また、施設 B では 30 日前にも有意に低い係数が得られた。なお、ランダムに発生させた地震との各ラグにおける有意な係数はみられなかった（データは示していない）。

Table14 各施設における有感地震の概要 (Mean \pm S.E.)

	回数	M	震源地からの距離 (km)	震源の深さ (km)
施設 B	285	4.4 \pm 0.1	132.0 \pm 8.7	51.2 \pm 2.9
施設 C	288	4.2 \pm 0.1	168.5 \pm 10.7	41.5 \pm 3.2

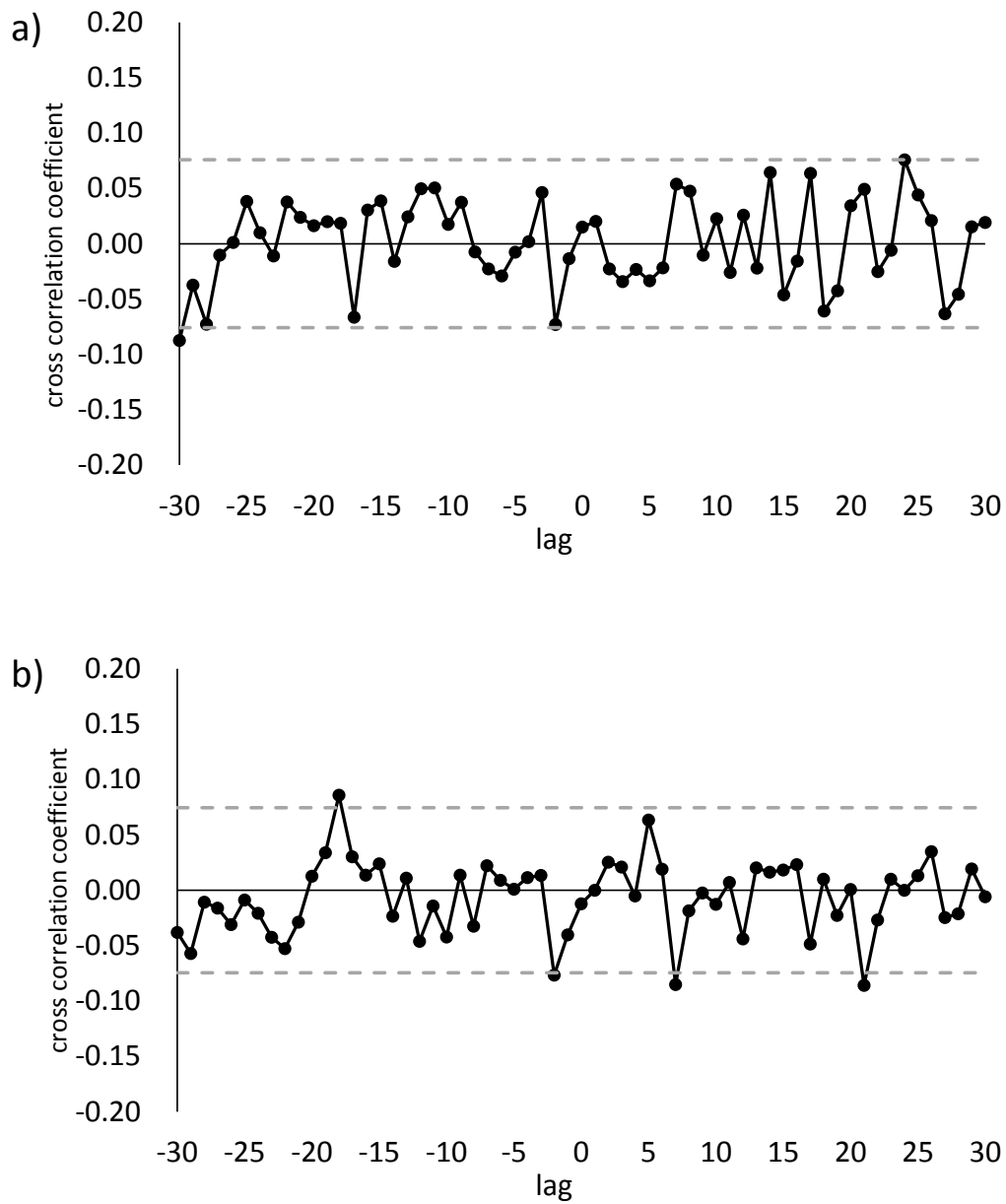


Fig. 18 a) 施設 B における有感地震と乳量との各 lag における相互相関係数 ; b) 施設 C における有感地震と乳量との各 lag における相互相関係数 ; 灰色の破線は信頼区間を表す

次に、日本国内で発生した M3.5 以上の地震であり、各施設と震源地間の距離が Dobrovolsky radius condition を満たす地震のみを対象として、 M_{eff} が 5.0 以上の日、5.5 以上の日、6.0 以上の日、6.5 以上の日と乳量とのタイムラグを、相互相関解析により検証した。

各条件に一致した日数は Table 15 に示した。また、Table 15 にはそれに加え、各条件の Meff を算出する際に実際に使用された地震の概要も示した。

その結果、施設 A において、地震の 6 から 10 日前に乳量の減少が多く、Meff5.0 以上では地震発生前との有意な相互相関係はみられなかったが、Meff5.5 以上では 8 日前 (-0.11) において、Meff6.0 以上では 6 日前 (-0.11)、7 日前 (-0.08)、8 日前 (-0.12) において、Meff6.5 以上では 8 日前 (-0.09)、9 日前 (-0.11)、10 日前 (-0.12) に有意な負の係数が得られた。また、Meff6.5 以上の 17 日前には有意な正の係数がみられた (Fig. 19-a)。一方、施設 B では地震の 12 日前から 17 日前に乳量の減少が多くみられ、Meff6.0 以上で 12 日前 (-0.08) と 17 日前 (-0.12) に、Meff6.5 以上で 14 日前 (-0.09) に有意な負の係数が得られた。また Meff6.0 以上では 26 日前 (-0.09) に、Meff6.5 以上では 4 日前 (-0.11) と 25 日前 (-0.09) にも係数が低くなったが、地震発生後にも有意な係数が複数みられた (Fig. 19-b)。施設 C に関しては、Meff6.0 以上の 25 日前 (-0.08) を除き、地震発生前における有意な負の係数はみられなかった (Fig. 19-c)。なお、ランダムに発生させた各 Meff 以上の日との各ラグにおける有意な係数はみられなかった (データは示していない)。

Table15 各条件の Meff を算出する際に使用された地震の概要 (Mean \pm S.E.)

	Mef	日数	M	震源地からの距離 (km)	震源の深さ (km)
施設 A	≥ 5.0	93	5.4 \pm 0.1	148.2 \pm 10.9	42.8 \pm 3.4
	≥ 5.5	48	5.6 \pm 0.1	182.1 \pm 17.6	47.6 \pm 5.4
	≥ 6.0	26	5.7 \pm 0.2	215.1 \pm 27.4	53.3 \pm 8.8
	≥ 6.5	10	6.1 \pm 0.3	312.1 \pm 55.9	59.8 \pm 23.1
施設 B	≥ 5.0	57	5.8 \pm 0.1	234.9 \pm 19.4	43.8 \pm 5.8
	≥ 5.5	40	6.0 \pm 0.1	283.2 \pm 23.2	46.8 \pm 7.7
	≥ 6.0	24	6.2 \pm 0.1	333.9 \pm 32.4	50.6 \pm 12.0
	≥ 6.5	10	6.6 \pm 0.2	447.8 \pm 56.2	64.1 \pm 28.3
施設 C	≥ 5.0	42	5.9 \pm 0.1	276.8 \pm 25.1	43.7 \pm 7.8
	≥ 5.5	32	6.1 \pm 0.1	334.6 \pm 28.1	45.6 \pm 10.2
	≥ 6.0	20	6.4 \pm 0.1	388.3 \pm 38.5	52.0 \pm 15.3
	≥ 6.5	9	6.8 \pm 0.1	520.6 \pm 53.4	69.0 \pm 33.3

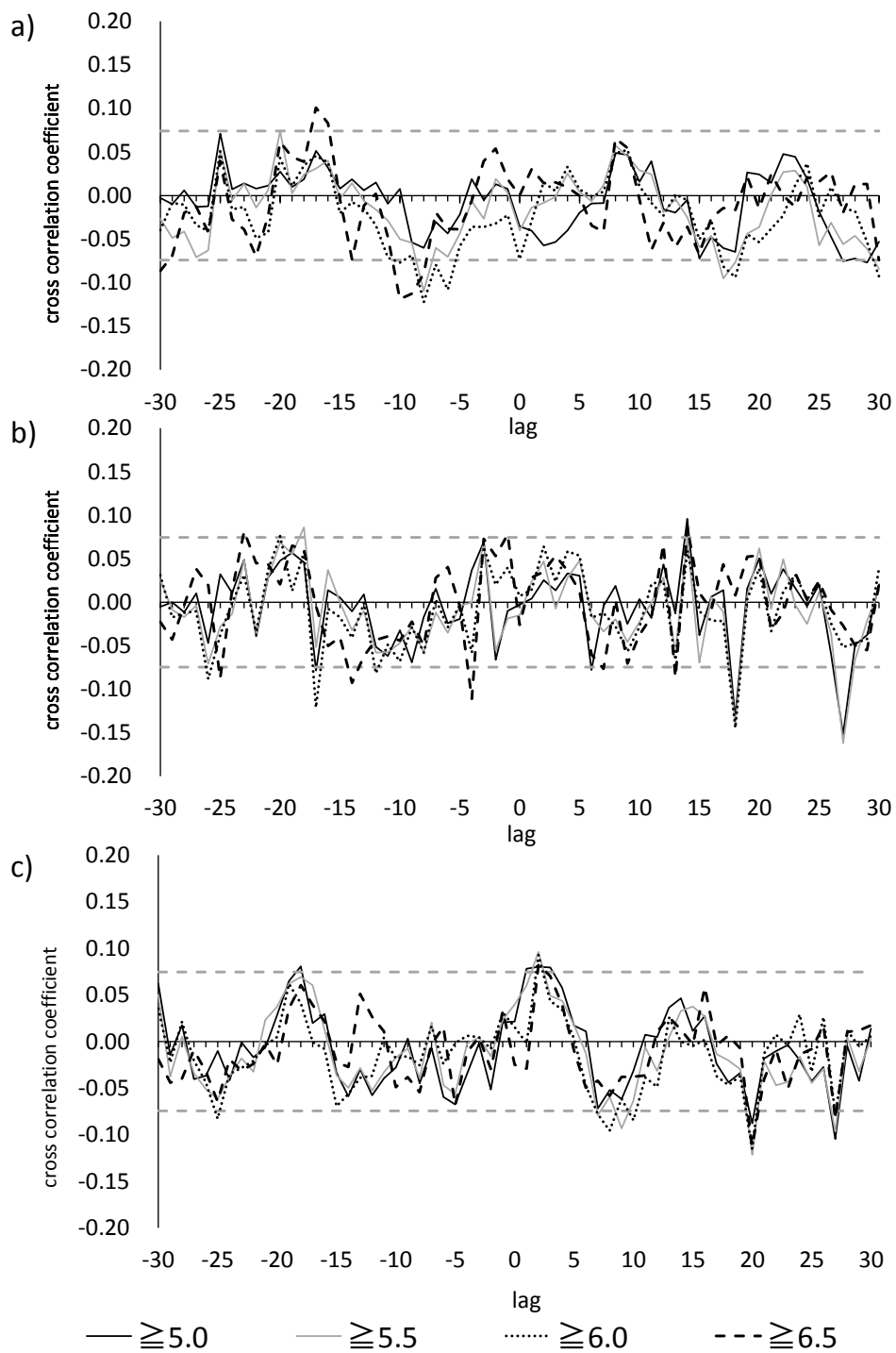


Fig. 19 a) 施設 A における各 M_{eff} と乳量の相互相関係数 ; b) 施設 B における各 M_{eff} と乳量の相互相関係数 ; c) 施設 C における各 M_{eff} と乳量の相互相関係数 ; 灰色の破線はそれぞれの信頼区間を示す

また、3箇所の施設から得られた乳量変動値の平均値と、全ての施設において Meff5.0 以上、Meff5.5 以上、Meff6.0 以上、Meff6.5 以上が観測された日との相互相関係数を算出した結果、Fig. 20 に示す結果が得られた。各条件に一致した日数と、各条件の Meff を算出する際に実際に使用された地震の概要は Table 16 に示した。8 日前から 15 日前に係数が低くなっており、Meff6.5 以上では 29 日前にも低くなっていた。また、得られた相互相関係数が偶発的なものかを確認するため、各条件の Meff を満たした日数と同数である架空の地震発生日をランダムに発生させ、相互相関解析を行った結果、Meff5.0 以上の日の 27 日前に信頼区間を超える負の相関がみられたが、それ以外は有意な係数はみられなかった (Fig. 21)。

Table16 各条件を満たした日数と各条件の Meff を算出する際に使用された地震の概要 (Mean ± S.E.)

Meff	日数	震源地からの距離 (km)			震源の深さ (km)		M
		施設 A	施設 B	施設 C			
≥5.0	38	197.3 ± 24.9	249.0 ± 27.5	302.4 ± 27.9	49.2 ± 9.1	6.0 ± 0.1	
≥5.5	30	228.7 ± 28.9	295.8 ± 30.0	353.7 ± 29.6	49.9 ± 11.2	6.2 ± 0.1	
≥6.0	20	281.6 ± 36.0	347.9 ± 37.8	400.2 ± 38.2	53.0 ± 16.0	6.4 ± 0.1	
≥6.5	9	395.7 ± 54.9	468.9 ± 54.6	520.6 ± 53.4	69.0 ± 33.3	6.8 ± 0.1	

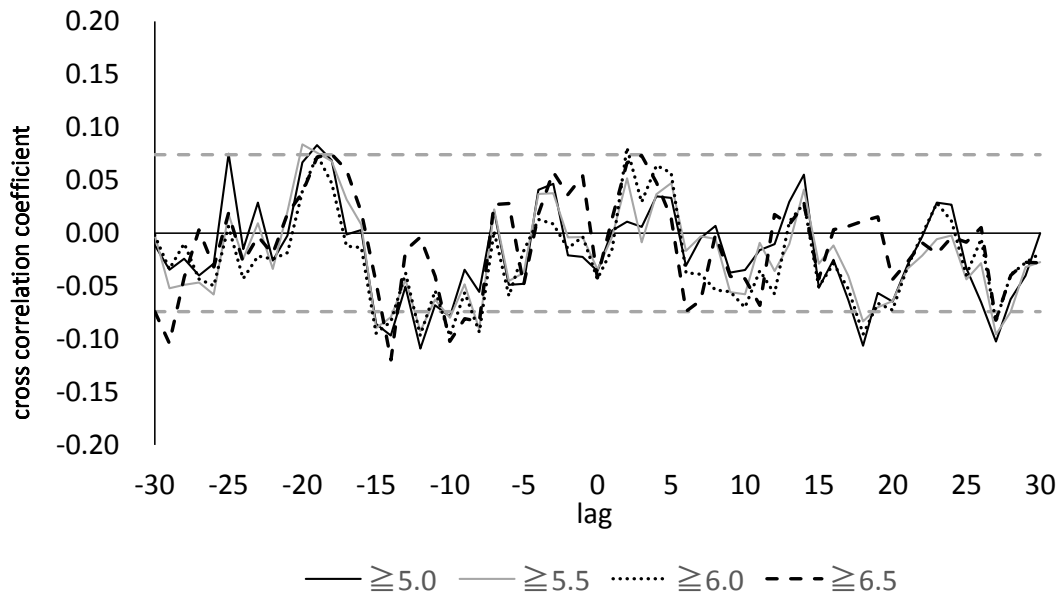


Fig. 20 全施設における各 Meff と全施設の乳量との相互相関係数

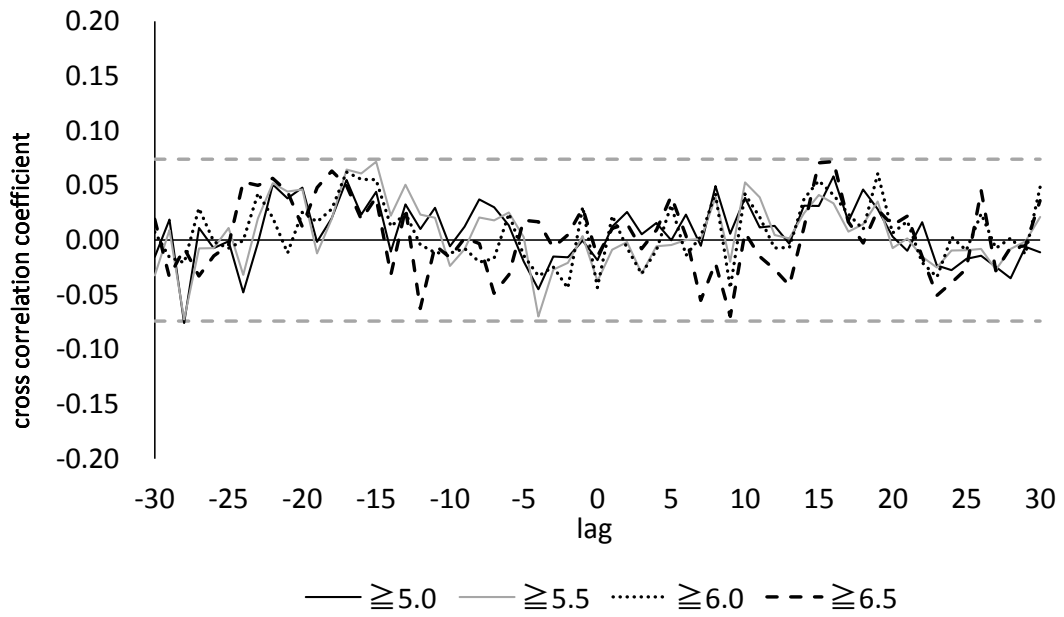


Fig. 21 ランダムに発生させた各 Meff と全施設の乳量との相互相関係数

地震の M、震源地からの距離、および深さと乳量変動値の関連性

地震との相互相関解析では、15 日前までに多くの有意な係数がみられた。対象とした地震が発生する 1 日前から 15 日前までの乳量変動値における最小値を従属変数として、対象とした地震の M、震源地からの距離、震源の深さを独立変数とした重回帰分析を行った。その結果、調査に使用した 3 施設別に行ったステップワイズ変数選択では、いずれの独立変数も選択されなかったが、全ての施設のデータを統合した場合のみ、M との有意な関連がみられた (Table 17 ; Fig. 22)。

Table17 対象地震の 1 日前から 15 日前までの乳量変動値における最小値に関連する要因を示す重回帰モデル

	coefficient	S.E.	t value	p value
定数項	-0.735	0.245	-2.997	0.003
M	-0.122	0.048	-2.565	0.011

* ステップワイズ変数選択で選択された変数のみ表示

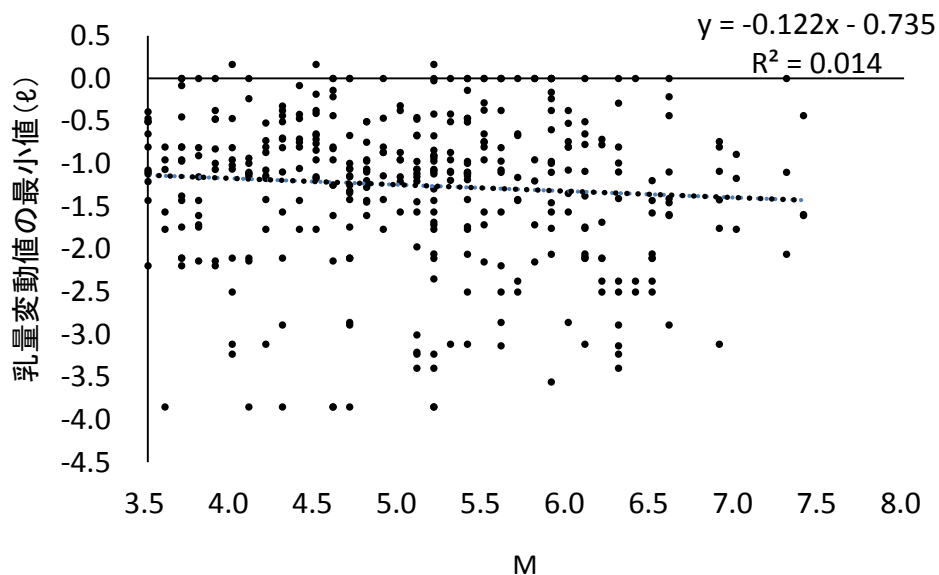


Fig. 22 対象地震の 1 日前から 15 日前までの乳量変動値における最小値と M を示す散布図 破線は回帰直線を示す

考察

「東北地方太平洋沖地震」に先行した乳量変動の有無の検証

震源地から 430 km 離れた施設 B と 490 km 離れた施設 C は、地震の約 1 ヶ月前から有意な減少はみられなかったが、震源地に最も近い施設 A (340 km) では、地震発生の 6 日前である 2011 年 3 月 5 日から、3 日前である 2011 年 3 月 8 日までの 4 日間、有意に減少していた。また、各施設の震源地からの距離と乳量変動値の間にもほぼ同様の期間において有意な関連がみられ、距離の近い方が、乳量の減少が大きかった。また、第一章においても震源地からの距離と地震前兆的行動の間には同様の関連がみられ、地震前兆的行動の事後調査を行った先行研究でも同様の結果が示されてきた (Rikitake, 2003; Whitehead *et al.*, 2004)。Table 13 に示すように、乳量が減少した期間において、施設 A が位置する場所から Dobrovolsky radius condition を満たす地震は発生しておらず、これらの減少は地震動による恐怖反応ではないと考えられる。このことから、施設 A における乳量の減少は、地震に先行して現れた何らかの物理・化学現象の変動や異常に起因すると考えられる。また、施設 A では 2 月 10 日にも有意な減少がみられ、2 月 8 日から 2 月 11 日まで、「東北地方太平洋沖地震」における震源地からの距離との間に有意な関連がみられた。この減少も「東北地方太平洋沖地震」の前兆であるかどうかは判断できないが、2 月 10 日には、施設 A で Dobrovolsky radius condition を満たす M5.4 の地震が発生しており、この地震と関連する減少である可能性が高い。また、この地震は 22 時 03 分に発生しており、既に当日の搾乳は終了していたため、この減少は地震動による恐怖反応ではないと考えられる。牛はさまざまな刺激によって乳量が減少することが知られている。その研究の多くは人為的な刺激であり、例えば、人のハンドリングの仕方によって乳牛の乳量は減少することが知られている (Rushen *et al.*, 1999)。他にも、新奇な環境への移動や他個体との隔離はコルチゾール濃度を上昇させ、オキシトシン濃度を減少させ、残乳量を増加させると報告されている (Rushen *et al.*, 2001)。しかし、

乳牛は地面の電位差に敏感であり、人工的な 1.8V ; 3.6mA の漂遊電圧への暴露は、活動量を増加させ、コルチゾール濃度を増加させ、乳量を減少させることも報告されている (Rigalma *et al.*, 2010)。地震の前兆現象には数多くの物理・化学的現象が報告されている。地面の電位差の変化は有名な地震前兆現象であり、ギリシャで発見された VAN 法として知られている (Lighthill, 1996)。この異常は、複数の地震前に現れたと報告されている (Eftaxias *et al.*, 2000)。また、日本においても、地震発生の 1 ヶ月以上前から地電流に異常がみられたとの報告も存在する (Uyeda *et al.*, 2000)。その他に、磁場の異常も地震発生前に観測されることがあり、地震の約 3 時間前に磁場強度が増加したとの報告が存在する (Fraser - Smith *et al.*, 1990)。また、牛や鹿は磁場を感知する能力を有しており、衛星写真を用いた研究では、牛は南北に対して平行に頭部と尾部を位置させると報告されている (Begall *et al.*, 2008)。本調査で現れた乳量の減少は、このような地電流や磁場の異常によるものかもしれない。また、有意な減少がみられた施設 A のみで、乳量変動値と年齢に有意な関連性がみられ、年齢が高くなるにつれ乳量が減少していた。このような関連性を示した原因として、年齢が高い搾乳牛は過去に大きな地震を経験している確率が高く、搾乳牛の乳量を減少させる前兆現象への古典的条件付けが成立していれば、このような結果が現れる可能性がある。しかし本調査で使用した全ての搾乳牛は過去に震度 5 以上の地震は経験していなかった。地震前兆的行動に関してこのような報告は存在せず、また搾乳牛における年齢とストレス刺激への反応性に関する報告もこれまでにされていないため、今後の基礎研究が望まれる。

タイムラグの推定

地震による被害の大きさは、M、震源地からの距離、および震源の深さにより異なる。地震を予測する場合、これらの要素と発生日時を推測できなければ意味がないと考えられる。しかし、前兆現象の強度は M、震源地からの距離、および震源の深さの全てに依存している

可能性があり、本調査では、これらの要素に依存して変化する震度に焦点を当てた。震度 1 以上である有感地震と乳量との関連性を検証した結果、解析に供した施設 B と施設 C の両方で 2 日前に有意な、もしくはほぼ有意水準に近い負の相関がみられた。

Maekawa ら (2006) が考案した Meff を、その大きさによって 4 種類の条件を設け、相互相関解析を行った結果、施設 A のみ、Meff の上昇に伴い、数日前における乳量の減少と強い関連がみられた。また、Meff6.0 以上までは 6 日前から 8 日前に有意な関連がみられていたのに対し、Meff6.5 以上では 8 日前～10 日前に有意な関連が現れており、この結果から、M が大きさによって乳量減少に関する先行期間は伸びる可能性が示唆された。数多くの地震に関連して報告された地震前兆的行動を集計すると、地震前兆的行動が現れた期間は M が大きくなるにつれ早くなるという報告が存在する (力武, 2001)。また、同様の現象はラドン濃度など、縦断的に観測された現象においても報告されており (力武, 2001)、本調査結果と一致する。また、全ての施設の乳量変動値を平均し、全ての施設において各 Meff 以上が観測された日との相互相関解析では、8 日前から 15 日前において有意な負の係数が多くみられた。Table 17 に示すように、全ての施設で各 Meff 以上になる地震は M が大きくなるため、Meff5.0 以上でも、それを構成する地震の M は平均 6.0 であった。この結果もまた、M が大きいほど先行期間が早まるという可能性を支持している。また、有感地震の場合、2 日前に乳量が下がる結果となった。観測された有感地震は Table 14 に示すように、M の平均が 4 と小さかったことから、この違いも同様の原因によるものかもしれない。また、本研究に類似した方法で長期間における電離層の異常と地震との関連性を検証した研究はいくつか存在し、Maekawa ら (2006) は Meff6.0 以上で 2 日から 6 日前に異常がみられると報告しており、Fujiwara ら (2004) は M4.5 以上の地震の 1 日から 5 日前に異常がみられると報告している。地震前兆的行動や乳量の減少が何の刺激によって生ずるのかは不明であるが、地表面に現れた異常が電離層に到達するまでに動物は反応しているのかもしれない。一方、施設 B ではこのような顕著な関連はみられなかったが、Meff6.5 以上において 4 日前と 14

日前の乳量との間に負の相関がみられた。14 日前には施設 A でもほぼ信頼区間まで係数が低くなっているが 4 日前の係数は低くなかった。Meff6.5 以上の日は施設 A と施設 B では同一の地震から構成されており、これは、震源地からの距離によって前兆現象が現れる時間が異なることを示している可能性がある。また、施設 C ではどの Meff でも発生前に有意な係数はみられなかった。さらに、施設 B と施設 C は地震活動の高い日の数日後にも有意な係数がみられた。この 2 つの施設が位置する場所では、ほとんどの Meff において条件を満たした日は施設 A より少なく、また施設 A から施設 C にかけて Meff を構成する地震の震源地からの距離が増加していることが原因となっているかもしれない。

地震の M、震源地からの距離、および深さと乳量変動値の関連性

地震前兆現象と地震の M、震源地からの距離、深さとの定量的関連性を示した研究は数少ない。相互相関解析の結果、地震の M によって乳量が減少する期間はことなる可能性が示されたことから、本調査では地震の 1 日前から 15 日前までの各施設の乳量変動平均値の最小値との関連性を検証した。施設ごとでの検証では有意な関連は見いだせなかったが、全てを統合すると M のみ、有意な関連がみられ、M が大きいほど乳量は減少する結果となった。しかし、 R^2 は 0.02 と低く、ばらつきが大きかった。しかし、「東北地方太平洋沖地震」の前兆には距離との関連性がみられたことから、少なくとも震源地からの距離と乳量は無相関ではないと考えられる。断層によって地震活動の活発度は異なり、特に三陸沖の海溝部付近では「東北地方太平洋沖地震」の余震の影響もあり、頻繁に M の大きい地震が生じていた。このように、M と距離、震源の深さは複雑に絡まっているため、それぞれの要因ごとに、他の要因をできる限り揃えた状態で検証しなければならないかもしれないが、そのためにはより長期間における、より多くの施設のデータが望まれる。また、これらの要因とのモ

デルを作ることができれば、乳量変動値から M などを予測することができると考えられる。

結論

2011年3月11日に発生した Mw9.0 の「東北地方太平洋沖地震」に先行した搾乳牛における乳量の減少が約1週間前から、震源地から約340 km 離れた場所で確認された。また、統計的に複数の地震と乳量との関連性を検証した結果、M が大きい地震、もしくは地震活動の活発な地震ほど乳量が減少することが示され、M の大きさに伴い減少する期間が異なる可能性が示唆され、約15日以内に乳量の減少は現れる可能性が示唆された。近年、酪農家が減少していく一方で、一牧場当たりの飼養頭数は増加している。それに伴って個体別の乳量を簡便に記録できるようなシステムを導入する牧場は増えていることから、多地点における観測が可能である。本調査は、搾乳牛における乳量が地震を予測するためのパラメーターになり得ることを示唆した。

第二節

地震前兆としての採卵鶏における産卵率に関する調査

緒言

搾乳牛における乳量は、地震に先立って減少することが第三章第一節によって明らかとなった。乳量と同様、採卵鶏における産卵率もストレス刺激への暴露によって低下することが報告されており (Barnett *et al.*, 1992; Hamm, 1967; Sefton and Crober, 1976; Sefton, 1976)、産卵率は地震発生前に低下する可能性が考えられる。産卵率が地震前兆に低下したとの報告は見当たらないが、鶏における地震前兆的行動は報告されている (Wang *et al.*, 2006)。2009年に発生したラクイラ地震 (M6.3) では、1日前に採卵鶏に関する行動の異常が報告されている (Fidani, 2013)。採卵鶏は一般的に乳牛に比べ飼養羽数が多く、個体別の産卵を記録している農場は少ないと考えられるが、鶏群単位では日々記録される生産データである。動物を用いて地震予測を行う場合、動物は毎日さまざまな刺激にさらされ、それに伴い地震とは無関係な変動も示していることを考慮しなければならない。したがって、さまざまな地震前兆現象を多地点で観測し、統合したデータを基に予測することが最も望ましいと考えられる (Ogata, 2013)。実際に、1978年に発生した伊豆大島近海地震では、複数の地震前兆現象を統合して地震予測した場合、単一の現象だけで予測するよりも精度の高い予測ができたとも報告されている (Utsu, 1979)。したがって、採卵鶏における産卵率が地震に先行して低下するのであれば、搾乳牛における乳量や、動物の行動頻度に関する情報と統合することで、より精度の高い地震予測が可能になると考えられる。

本節では、地震前における採卵鶏の産卵率が変化するか、また変化する場合、どのような地震の前により顕著に変化するかを明らかにするため、異なる地域に位置する複数の養鶏場を対象として、約3年間にわたる日々の鶏群別産卵率データを用い、東北地方太平洋沖地震に先行した産卵率変動の有無、地震活動の活発な日と産卵率変動とのタイムラグ、および産卵率変動と地震の特徴 (M、震源地からの距離、および震源の深さ) との関連性を検証した。

方法

対象動物と対象施設

茨城県石岡市に位置する茨城県畜産センター (36.21°N, 140.23°E ; 施設 A)、埼玉県深谷市に位置する株式会社 B が運営する養鶏場 (36.16°N, 139.22°E ; 施設 B)、神奈川県海老名市に位置する神奈川県農業技術センター畜産技術所 (35.35°N, 138.57°E ; 施設 C)、および静岡県菊川市に位置する静岡県畜産技術研究所 中小家畜研究センター (34.76° N, 138.07° E ; 施設 D) の計 4 施設の協力を得て、各施設で飼育される卵用種の採卵鶏における日々の産卵率データを用いた。各施設の位置情報を示した地図は Fig. 23 に示した。全ての施設はオールイン・オールアウト方式を用いており、産卵率は鶏群ごとに記録されていた。なお、産卵率に影響を及ぼす可能性のある試験等に用いられた動物のデータは本研究から除外した。調査に用いた対象動物の飼養羽数と鶏群数は Table 18 に、飼養管理方法は Table 19 に示した。施設 B を除く全ての施設において、採卵は職員によって定時に行われた。施設 C は試験期間中に合計 12 銘柄の鶏種を飼養し、年度ごとに 4 から 6 銘柄ずつ飼養していた。また、ウィンドウレス鶏舎とオープン鶏舎を年度ごとに交互に使用していた。施設 D ではウィンドウレス鶏舎とオープン鶏舎を併用していた。

Table18 各施設における対象動物の概要

施設	緯度	経度	品種	鶏群数/日			産卵羽数/日		
				(Mean	±	S.E.)	(Mean	±	S.E.)
A	36.21	140.23	白玉鶏 1 銘柄	1.00	±	0.00	421.0	±	1.8
B	36.16	139.22	白玉鶏 1 銘柄	4.44	±	0.02	259496.6	±	1286.7
			白玉鶏 6 銘柄						
C	35.42	139.41	赤玉鶏 5 銘柄	5.90	±	0.06	495.7	±	2.3
			ピンク玉鶏 1 銘柄						
D	34.76	138.07	白玉鶏 1 銘柄	1.72	±	0.02	1191.9	±	14.1

Table 19 各施設における対象動物の概要

施設	鶏舎	採卵時刻
A	オープン	08 : 00-09 : 00
B	ウィンドウレス	08 : 00-19 : 00
C	ウィンドウレス or オープン	09 : 00-10 : 00 13 : 00-14 : 00
D	ウィンドウレス + オープン	13:00

対象期間

2011年1月1日～2013年12月31日までの産卵率データを対象とした。

解析方法

採卵鶏は、約19週齢から産卵が始まり、約8週間から9週間は増加し続け、産卵ピークを超えると徐々に産卵率は減少していき、約1年で産卵を終える (North, 1984)。このような産卵曲線は長期間における地震との関連性を検証するためには補正する必要があると考えられる。産卵曲線はいくつかの非線型モデルを用いた修正が行われているが、McMillanら (1986) や Yang ら (2006) によって作成されたモデルは頻繁に用いられている。しかし、これらのモデルに対する評価は先行研究によって異なるため (Ganesan *et al.*, 2011; Savegnago *et al.*, 2012)、本調査では、補正後のばらつきを減らすため、施設ごとに2つのモデルに適合させた。より適合しているモデルを、モデルの適合度の評価に多く用いられるAIC (Akaike's Information Criterion) を用いて判断し、AICが小さいモデルは以降の解析に適用した。McMillanモデルとYangモデルは式12と式13にそれぞれ示した。修正には非線形モデル (nls function; R software version 2.15.0) を用いて Gauss-Newton 法によって収束解を求め、パラメーターの値を得た。なお、産卵率はこれらのモデルへの修正時のみ、より適切なパラメーター値を得るため、3項の移動平均値を用いた。

$$y_t = a \left\{ 1 - e^{-b(t-c)} \right\} e^{-dt} \quad (\text{式 12})$$

- y_t . . . 日時 t における産卵率の 3 項移動平均値
 a . . . 潜在的な最大産卵率
 b . . . 産卵増加率
 c . . . 産卵開始時期
 d . . . 産卵減少率

$$y_t = a \left\{ 1 + e^{-b(t-c)} \right\}^{-1} e^{-dt} \quad (\text{式 13})$$

- y_t . . . 日時 t における産卵率の 3 項移動平均値
 a . . . スケールパラメタ
 b . . . 性成熟における相反指標
 c . . . 性成熟の平均年齢
 d . . . 産卵能力の減少率

次に、得られたモデルから、期待される産卵率と実際に記録された産卵率との差を求め、産卵率変動値①を求めた（式 14）。

$$\text{産卵率変動値①} = \text{実産卵率} - \text{期待産卵率} \quad (\text{式 14})$$

また、採卵鶏は環境温度や相対湿度が上昇することによって暑熱ストレスを受け、産卵率などの生産性が低下することが知られている (Zulovich and DeShazer, 1990; Al-Saffar and Rose, 2002; Mashaly *et al.*, 2004)。環境温度と相対湿度による暑熱ストレスの指標には THI (Thermal Humidity Index) を用いて産卵率との関連性を検証した報告では、70 以上で産卵率が下がり始めるとされている (Karaman *et al.*, 2007)。また、環境温度と産卵率の関連性に関して、21℃以上で線型的に減少することも報告されている (Reid, 1979;

Timmons and Gates, 1988)。このような関係は、暑熱ストレスによる摂食量の低下に起因すると考えられ、搾乳牛における研究では、THI の上昇と乳量の減少には時間的なラグが存在し、THI は 2 日前の乳量と最も適合度の高い関係を示す (West *et al.*, 2003)。地震との関連性を検証するためには、このような暑熱ストレスによる影響をあらかじめ除去する必要があると考えられる。採卵鶏における生産性と THI などの暑熱ストレスの指標となる環境変数とのラグに関する研究は行われていなかったため、West ら (2003) の方法にしたがい、まず THI の上昇と産卵率の低下間のラグを検証した。即ち、THI を従属変数とし、当日、1 日前、2 日前、および 3 日前の全ての施設における採卵鶏の産卵率を独立変数とし、ステップワイズ変数選択を用いた重回帰分析を行った。THI の算出には、各施設に最も近い気象観測点において観察された 1 日当たりの平均温度と平均相対湿度を用いた。THI を算出するための方程式は、Karaman ら (2007) が用いた方程式 (Bouraoui *et al.*, 2002) を用いた (式 15)。

$$THI_t = 1.8 T_t - (1 - H_t)(T_t - 14.3) + 32 \quad (\text{式 15})$$

T . . . 摂氏温度

H . . . 相対湿度

解析期間中における平均温度と平均相対湿度のデータは気象庁ホームページ (<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>) から入手した。対象とした採卵鶏は鶏舎内で飼育されるため、鶏舎内の THI に強い影響を受けていると考えられる。したがって外気の THI が 70 を超えても暑熱ストレスを受けていない可能性があるため、本研究では各施設における THI と産卵率の関連性を検証した。また、本調査で使用した施設はオープン鶏舎とウィンドウレス鶏舎を併用している箇所もあった。ウィンドウレス鶏舎とオープン鶏舎では鶏舎内の温度管理のしやすさが異なるため、このような 2 種類の鶏舎を使用する施設では、鶏舎の種類別に検証した。産卵率を減少させる THI の臨界点、および臨界点以上の THI とそれに最も

良い関連性を示したラグにおける産卵率との関連性を推測するため、第三章 第一節と同様に、戸田ら（2002）と Vitali ら（2009）の方法を一部改変し、折れ線回帰モデルを用いて式 10 の各係数を最小二乗法によって推測した。推測されたモデルから、各日における期待される産卵率を算出し、産卵率変動値①から引くことによって産卵率変動値②を求めた（式 17）。

$$\text{産卵率変動値②} = \text{産卵率変動値①} - \text{期待産卵率} \quad (\text{式 17})$$

ここで、得られた産卵率変動値②には、複数のパルス状の大きな変動がみられ、このような変動は記録のミスや卵の取りこぼしによるものであると判断し、スミルノフグラブス検定を行い、有意な外れ値は棄却した。日齢と暑熱ストレスによる影響を除去した産卵率変動値には、わずかな傾向変動が残っている可能性がある。そのため Maekawa ら（2006）の方法を一部改変し、各日の 1～7 日前までに測定された産卵率変動値②の平均値から、各日に測定された産卵率変動値を引くことで、傾向変動を除去した。式は第二章の式 5 と同様である。これを最終的な産卵率変動値として地震との関連性の検証に用いた。

地震との関連性の検証

「東北地方太平洋沖地震」に先行した産卵率変動の有無の検証

まず、2011 年 3 月 11 日 14:46 JST に三陸沖を震源として発生した「東北地方太平洋沖地震」に先行した産卵率の変化の有無を検証した。産卵率は個体別のデータではなく、第三章 第一節と同様の解析を用いることはできなかつたため、第二章で行った複数の地震に関連した行動頻度の変化を検証する際に用いた方法によって検証した。即ち、先行研究で用いられた方法（Yokoi *et al.*, 2003; Ouzounov *et al.*, 2011; Hayakawa *et al.*, 2012）を一部改変し、本調査では、前述の処理によって得られた産卵率変動値を、各日から 1 ヶ月前までの標準偏差で規格化を行い、「東北地方太平洋沖地震」に関連した産卵率の変動を調べた。

次に、施設から震源地までの距離と、産卵率変動値に関連があるかどうかを調べるため、2011年2月1日から2011年3月11日までの1日ごとに、距離を従属変数、産卵率を独立変数として単回帰分析を行った。

タイムラグの検証

地震の発生と産卵率の変動に明確なタイムラグが存在するかを検証するために、第三章第一節と同様の方法で解析を行った。

地震のM、震源地からの距離、および深さと産卵率変動値の関連性

産卵率に変化をもたらすM、震源地からの距離、および深さの閾値を推定するため、2011年5月1日～2013年12月31日に、日本国内（30.0～45.0°N, 128.0～149.0°E; Fig. 7）で発生したM3.5以上の地震を対象として、重回帰分析を用いて検証した。各施設の産卵率変動値を従属変数とし、M、震源地からの距離、および震源の深さは独立変数として用いた。また、各独立変数には産卵率を低下させる閾値が存在し、従属変数と線型性を示さないかもしれないと考え、本調査では各独立変数において2次の多項式回帰を用いた。

すべての統計解析における有意水準は $P \leq 0.05$ とした。

結果

各施設において、2種類の産卵曲線モデルを比較した結果、施設 A、B、C は Yang モデルの方が AIC が小さく、施設 D は McMillan モデルの方が AIC が小さくなり、それぞれの施設において AIC が小さいモデルによる修正を適用した。また、THI に最も良く関連していたのは、2 日前の産卵率であったことから、THI と 2 日前の産卵率を用いて、折れ線回帰分析を行った。臨界より高い THI と 2 日前の産卵率に有意な線型関係がみられた鶏舎における THI の臨界点は 67.2 から 72.3 までの範囲内であった。

「東北地方太平洋沖地震」に先行した産卵率変動の有無の検証

東北地方太平洋沖地震の震源地から各施設までの距離と、各施設が位置する都道府県内の震度観測点で計測された最大震度は Fig. 23 に示した。なお、施設 A における鶏群は 2011 年 1 月 28 日から産卵が始まり、 σ で規格化したデータは 2011 年 3 月 4 日から始まった。そのため 3 月 11 日の前兆を判断するには不適切と考え、本解析には施設 A は用いず、Fig. 23 には震源地からの距離と震度は示していない。2011 年 2 月 1 日から 2011 年 3 月 11 日 14:46 までに発生した地震のうち、少なくとも 1 箇所の施設で Dobrovolsky radius condition 内に入った地震のリストを Table 20 に示した。2 月 1 日から 3 月 11 日までの各施設における産卵率変動値は Fig. 24 に示した。また施設 A における産卵率は解析から除外したため Fig. 24 に示さなかった。施設 B は 3 月 2 日に -2.7σ 、4 日に -3.2σ と減少しており、5 日には $+3.3\sigma$ と上昇していた。施設 C は 2 月 18 日が -3.0σ の低下がみられた。また、施設 D では -2σ を超える日は 2 月 28 日 (-2.0σ) においてのみ確認され、2 月 11 日 ($+2.5\sigma$) と 2 月 24 日 ($+2.7\sigma$) には上昇がみられた。また、各施設から震源地までの距離と産卵率変動値の関連性を調べるため、2011 年 2 月 1 日から 2011 年 3 月 11 日までの各日において単回帰分析を行った結果、3 月 2 日のみ、有意な関連性がみられ、距離が近い方が産卵率が低下していた ($P < 0.05$; Table 21)。

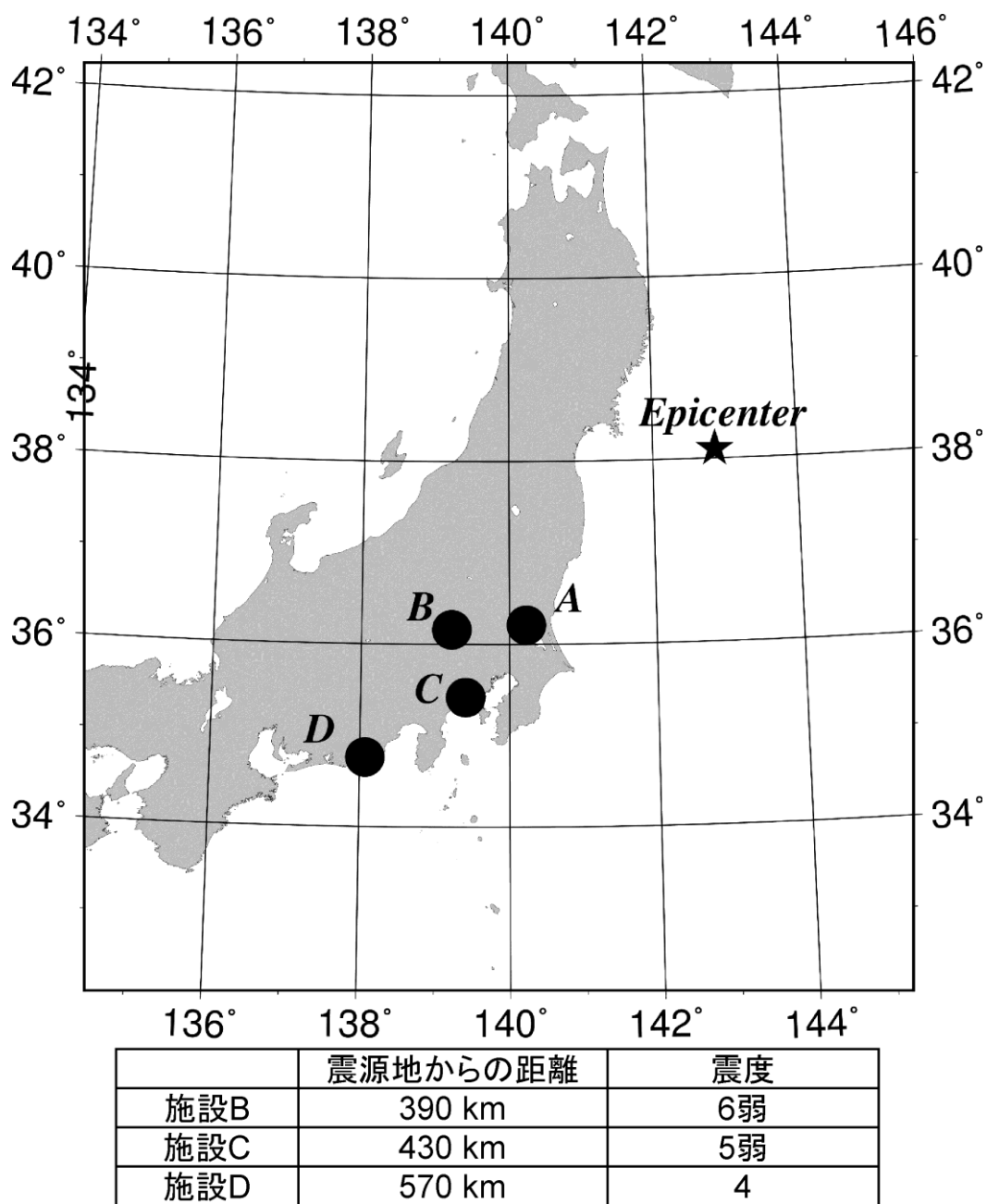


Fig. 23 「東北地方太平洋沖地震」の震源地を示した地図；黒丸は各養鶏施設の位置を示す；下表は各施設と震源地までの距離と、各施設が位置する都道府県内の地震計で観測された最大震度を示す；施設 A は東北地方太平洋沖地震との関連性を検証していないため、下表から除外している

Table 20 2011年2月1日から2011年3月11日 14:46までに、いずれかの施設で Dobrovolsky radius condition を満たす範囲内で発生した地震のリスト

日付 [yyyy/mm/dd]	時刻 [hh:mm]	緯度	経度	震源地からの距離(km)			Dobrovolsky radius (km)	深さ(km)	M
				施設 B	施設 C	施設 D			
2011/02/05	10:56	34.86	140.62	190	130	230	170	64	5.2
2011/02/26	04:12	34.44	140.37	220	140	210	140	56	5.0
2011/02/27	05:38	36.16	137.45	160	190	160	230	4	5.5
2011/03/07	15:13	35.68	139.28	50	30	150	40	140	3.8
2011/03/09	11:45	38.33	143.28	430	470	610	1380	8	7.3
2011/03/09	11:57	38.32	143.40	440	480	620	460	12	6.2
2011/03/10	03:16	38.27	142.88	400	440	580	560	29	6.4
2011/03/10	03:44	38.48	143.43	450	490	630	510	36	6.3
2011/03/10	06:22	38.13	143.22	420	450	590	510	18	6.3
2011/03/10	06:23	38.17	143.04	410	450	590	840	9	6.8
2011/03/11	14:46	38.10	142.86	390	430	570	7410	24	9.0

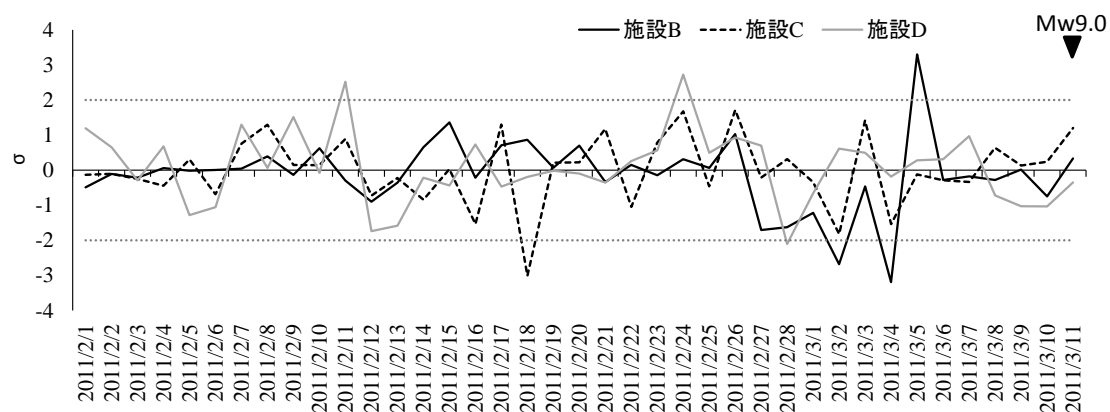


Fig. 24 2011年2月1日から2011年3月11日までの各施設における σ で規格化した産卵率変動値；灰色の破線は $\pm 2\sigma$ の境界線を示し、▼は地震発生日を示す

Table 21 2011年3月2日における産卵率変動値と震源地からの距離の関係を示す回帰モデル

	coefficient	S.E.	t value	P value
定数項	528.79	1.96	269.81	0.002
震源地からの距離	39.91	0.77	51.63	0.012

タイムラグの検証

施設 B と施設 C における有感地震と産卵率の関連性を相互相関解析を用いて検証した結果、Fig. 25 に示す相互相関係数が得られた。期間中に発生した有感地震の概要は Table 22 に示した。施設 A は期間中、ほぼ毎日有感地震が発生していたため、本解析からは除外した。なお、データは 2011 年 5 月 1 日から 2013 年 12 月 31 日までの産卵率である。横軸の lag0 は、有感地震と地震当日の産卵率との関連性を、lag1 は地震 1 日後の産卵率との関連性を、lag-1 は地震 1 日前の産卵率との関連性を示している。正の係数は正の相関を意味し、負の係数は負の相関を意味している。各施設における係数の信頼区間はグラフ内の破線で示した。施設 B では地震発生の 15 日前 (-0.06) と 24 日前 (-0.07) における係数が有意に低かった。施設 C では地震発生の 1 日前 (0.07) と 4 日前 (0.08) において有意に高い係数が得られた。また地震発生後にも有意な係数が複数みられた。施設 D では地震発生の 7 日前 (-0.07) に有意に係数が低く、5 日前 (0.07) と 13 日前 (0.07) における係数が高かった。なお、ランダムに発生させた架空の有感地震との各ラグにおける有意な係数はみられなかった (データは示していない)。

Table22 各施設において 2011 年 5 月 1 日から 2013 年 12 月 31 日までに発生した震度 1 以上の地震の概要 (Mean ± S.E.)

	回数	震源地からの距離 (km)	震源の深さ (km)	M
施設 B	422	171.8 ± 6.4	47.2 ± 2.3	4.5 ± 0.0
施設 C	279	145.5 ± 10.4	55.2 ± 3.3	4.4 ± 0.1
施設 D	250	223.4 ± 14.1	47.5 ± 4.1	4.2 ± 0.1

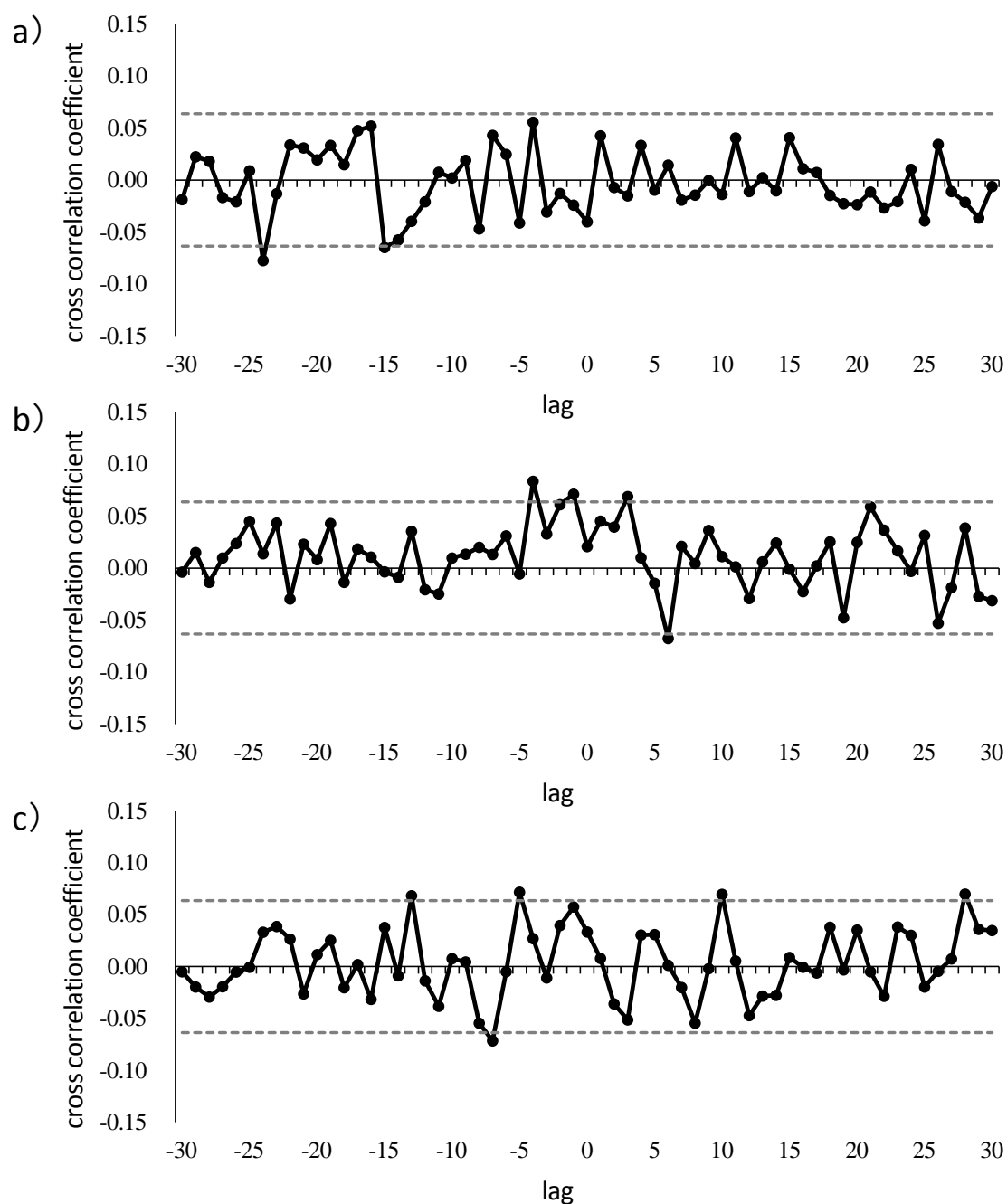


Fig. 25 a) 施設 B における有感地震と産卵率との各 lag における相互相関係数 ; b) 施設 C における有感地震と産卵率との各 lag における相互相関係数 ; c) 施設 D における有感地震と産卵率との各 lag における相互相関係数 ; 灰色の破線は信頼区間を表す

次に、日本国内で発生した M3.5 以上の地震であり、各施設と震源地間の距離が Dobrovolsky radius condition を満たす地震のみを対象として、 M_{eff} が 5.0 以上の日、5.5 以上

の日、6.0 以上の日、6.5 以上の日と産卵率とのタイムラグを、相互相関解析により検証した。各条件に一致した日数は Table 23 に示した。また、Table 23 には各条件の Meff を算出する際に実際に使用された地震の概要も示した。施設 A では、Meff5.5 以上と Meff6.0 以上の 1 日前 (-0.10) に有意な負の係数が得られ、Meff5.5 以上の 24 日前 (-0.09) と 25 日前 (-0.08) に、Meff6.0 以上の 24 日前 (-0.11)、25 日前 (-0.10)、および 26 日前 (-0.09) に、Meff6.5 以上の 24 日前 (-0.08)、25 日前 (-0.08)、26 日前 (-0.09)、および 27 日前 (-0.08) に有意な負の係数がみられた。また、正の係数が Meff6.5 以上でのみ、14 日前 (+0.07)、15 日前 (+0.08)、16 日前 (+0.07)、17 日前 (+0.09) にみられた (Fig. 26-a)。施設 B では、負の係数が得られたのは Meff6.0 以上の 24 日前 (-0.08) と Meff6.5 以上 (-0.09) の 24 日前のみであり、Meff6.0 以上の 16 日前 (+0.07)、および Meff6.5 以上の 22 日前 (+0.09) と 23 日前 (+0.08) には有意な正の係数が得られた (Fig. 26-b)。一方施設 C では、Meff5.5 以上、Meff6.0 以上、Meff6.5 以上の 24 日前に有意な負の係数がみられた。係数はそれぞれ、-0.06、-0.12、-0.09 であった。また、Meff6.0 以上の 14 日前 (+0.08) と Meff6.5 以上の 14 日前 (+0.09) には正の係数が得られた (Fig. 26-c)。施設 D では、Meff6.0 以上の 6 日前 (-0.07) と Meff6.5 以上の 12 日前 (-0.08)、Meff5.0 以上の 27 日前 (-0.08) に有意な負の係数が得られ、Meff5.0、5.5、6.5 以上の 17 日前と、Meff6.5 以上の 21 日前、Meff5.5、6.0、6.5 以上の 22 日前、Meff5.0、5.5、6.0 以上の 29 日前には有意な正の係数が得られた (Fig. 26-d)。また、全ての施設において地震発生後にも有意な係数が複数みられた。なお、ランダムに発生させた各 Meff 以上の日との各ラグにおける有意な係数はみられなかった (データは示していない)。

Table23 各条件の M_{eff} を算出する際に使用された地震の概要 (Mean \pm S.E.)

		日数	震源地からの距離 (km)	震源の深さ (km)	M
施設 A	≥ 5.0	119	138.5 \pm 8.6	42.5 \pm 2.6	5.3 \pm 0.1
	≥ 5.5	62	166.7 \pm 13.5	45.8 \pm 3.9	5.5 \pm 0.1
	≥ 6.0	33	208.3 \pm 21.1	49.2 \pm 6.6	5.7 \pm 0.1
	≥ 6.5	11	294.0 \pm 50.1	59.3 \pm 20.4	6.0 \pm 0.3
施設 B	≥ 5.0	81	216.4 \pm 13.8	44.8 \pm 5.4	5.7 \pm 0.1
	≥ 5.5	58	255.2 \pm 16.4	48.0 \pm 7.0	5.9 \pm 0.1
	≥ 6.0	29	316.5 \pm 26.3	48.7 \pm 10.2	6.2 \pm 0.1
	≥ 6.5	11	452.6 \pm 43.3	63.2 \pm 28.3	6.8 \pm 0.1
施設 C	≥ 5.0	76	229.2 \pm 16.0	47.1 \pm 5.7	5.8 \pm 0.1
	≥ 5.5	54	272.3 \pm 19.0	50.8 \pm 7.4	6.0 \pm 0.1
	≥ 6.0	30	332.9 \pm 27.5	48.9 \pm 9.8	6.2 \pm 0.1
	≥ 6.5	11	451.9 \pm 52.2	63.5 \pm 26.2	6.6 \pm 0.2
施設 D	≥ 5.0	30	340.5 \pm 37.0	57.7 \pm 14.2	6.1 \pm 0.1
	≥ 5.5	24	390.0 \pm 41.4	62.6 \pm 17.4	6.3 \pm 0.1
	≥ 6.0	19	424.7 \pm 47.3	52.7 \pm 16.8	6.5 \pm 0.1
	≥ 6.5	9	575.0 \pm 55.6	73.4 \pm 32.7	6.8 \pm 0.1

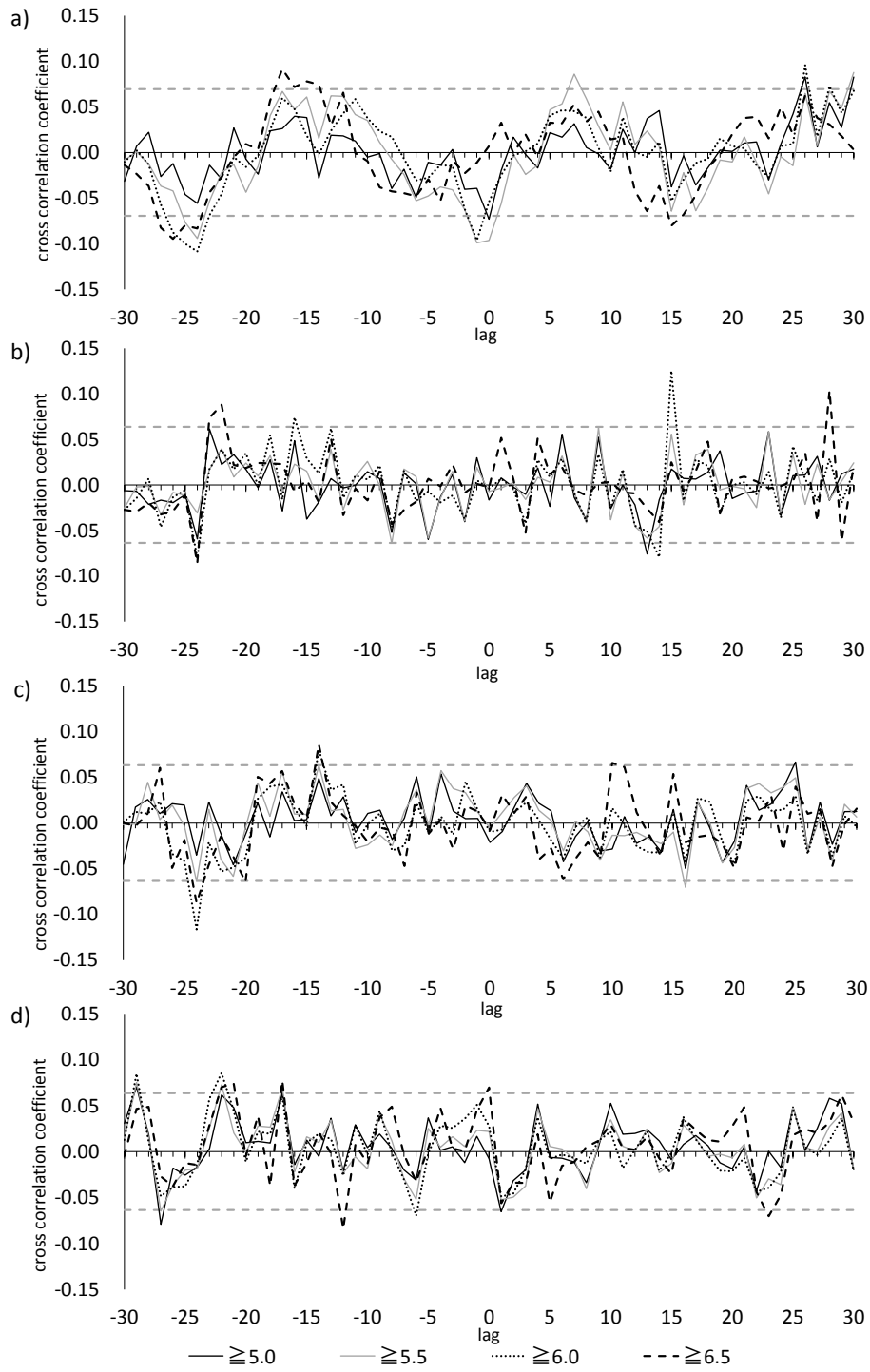


Fig. 26 a) 施設 A における各 M_{eff} と産卵率の相互相関係数 ; b) 施設 B における各 M_{eff} と産卵率の相互相関係数 ; c) 施設 C における各 M_{eff} と産卵率の相互相関係数 ; d) 施設 D における各 M_{eff} と産卵率の相互相関係数 ; 灰色の破線はそれぞれの信頼区間を示す

次に、調査対象とした4施設の全てにおける産卵率変動値と、全ての施設において $M_{eff}5.0$ 以上、5.5 以上、6.0 以上、および 6.5 以上を観測した日との相互相関係数を算出した結果、Fig. 27 の結果が得られた。また、各条件の M_{eff} を満たした日に発生した Dobrovolsky radius condition を満たす地震の概要は Table 24 に示した。 $M_{eff}6.5$ 以上において7日前 (-0.07) の係数は有意に低かった。また、24 日前から 27 日前にかけて有意な負の係数が多く、 $M_{eff}5.0$ 以上では 24 日前 (-0.09) と 27 日前 (-0.07) に、 $M_{eff}5.5$ 以上では 24 日前 (-0.07)、25 日前 (-0.08)、26 日前 (-0.06)、および 27 日前 (-0.11) に、 $M_{eff}6.0$ 以上では 24 日前 (-0.13)、25 日前 (-0.07)、26 日前 (-0.09)、および 27 日前 (-0.07) に、 $M_{eff}6.5$ 以上では 24 日前 (-0.13) と 26 日前 (-0.09) において有意に係数が低くなっていた。また、12 日前から 18 日前にかけて、有意に高い係数が多くみられた。また、得られた相互相関係数が偶発的なものかを確認するため、各条件の M_{eff} を満たした日数と同数である架空の地震発生日をランダムに発生させ、相互相関解析を行ったが、有意な係数はみられなかった (Fig. 28)。

Table24 全施設において各条件の M_{eff} を満たした日数と、各条件の M_{eff} を算出する際に使用された地震の概要 (Mean \pm S.E)

日数	震源地からの距離 (km)								震源の深さ (km)		M	
	施設 A		施設 B		施設 C		施設 D					
≥ 5.0	23	229.5 \pm 33.1	272.5 \pm 35.0	279.2 \pm 38.5	388.3 \pm 41.9	55.2 \pm 14.9	6.2 \pm 0.1					
≥ 5.5	19	247.1 \pm 38.0	306.4 \pm 37.1	317.5 \pm 40.5	432.3 \pm 43.6	55.9 \pm 17.4	6.4 \pm 0.1					
≥ 6.0	16	271.8 \pm 41.5	328.4 \pm 41.0	345.4 \pm 43.8	456.6 \pm 48.6	58.4 \pm 20.3	6.5 \pm 0.1					
≥ 6.5	8	367.1 \pm 58.6	428.6 \pm 54.2	453.0 \pm 57.7	567.9 \pm 61.0	75.2 \pm 36.1	6.8 \pm 0.1					

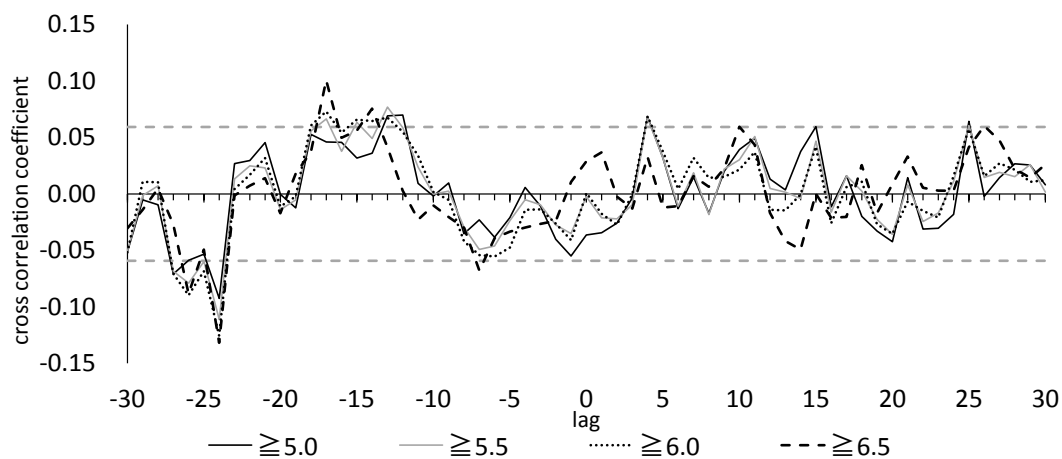


Fig. 27 全施設における産卵率変動値と全施設における $M_{eff}5.0$ 以上、 5.5 以上、 6.0 以上、および 6.5 以上の日との相互相関係数

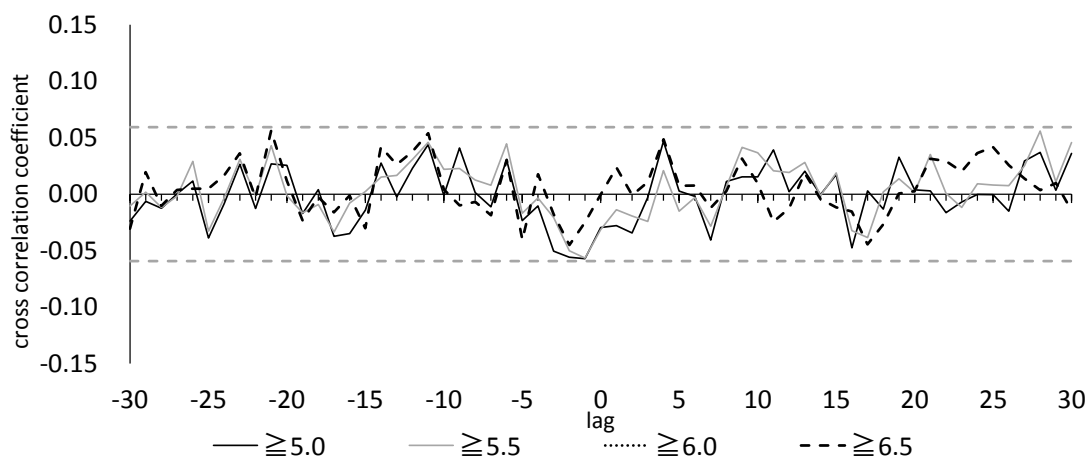


Fig. 28 全施設における産卵率変動値とランダムに発生させた各 M_{eff} 以上の日との相互相関係数

地震の M 、震源地からの距離、および深さと産卵率変動値の関連性

Dobrovolsky radius condition を満たす地震を対象にして、相互相関解析において有意な係数が多くみられた 27 日前までの産卵率に関連する要因を探るため、対象地震の M 、震源地からの距離、および震源の深さと、1 日前から 27 日前に観測された産卵率変動値の最小

値との関連性をステップワイズ変数選択を用いた 2 次の多項式回帰モデルによって検証した結果、2 次までの M と震源地からの距離において有意な回帰係数が得られた (Table 25)。

Table 25 地震の 1 日前から 27 日前の産卵率変動値における最小値に関連する要因を示す重回帰モデル

	coefficient	S.E.	t value	P value
定数項	-11.294	3.484	- 3.241	0.001
M	3.027	1.412	2.144	0.033
M ²	- 0.329	0.146	- 2.259	0.024
震源地からの距離	0.004	0.002	2.654	0.008

考察

「東北地方太平洋沖地震」に先行した産卵率変動の有無の検証

2011年2月1日から2011年3月11日までの産卵率変動値を施設ごとに σ で規格化した結果、 $\pm 2\sigma$ を超える値が複数みられた。施設Bにおいて、地震発生の9日前である2011年3月2日において -2σ を超える低下が、7日前である2011年3月4日において、 -3σ を超える低下がみられた。また、この日においてほかの施設では明らかな低下はみられなかったが、施設Cでは同様の変動がみられた。第三章 第一節における乳量変化は2011年3月5日から8日にかけて現れており、特に震源地に最も近い施設で低下していた。施設Bは震源地からの距離が390 kmと比較的遠いが、対象にした施設の中では最も震源地に近く、施設C(430 km)はその次に震源地に近かった。しかし、震源地から最も遠い施設D(570 km)ではこのような低下はみられなかった。また、震源地からの距離と産卵率との関連性を各日において検証した結果、3月2日においてのみ、震源地からの距離が近い方が有意に低下していた。このことから、2011年3月2日と4日に現れた産卵率の低下は、東北地方太平洋沖地震に関連した前兆である可能性が高い。また、施設Bにおいて3月5日に $+2\sigma$ を超える有意な上昇が観察された。本調査では、産卵率の変動値を出す際に、当日の産卵率から1~7日前の産卵率の平均値を差し引いているため、3月2日と4日の低下の影響を受けて生じたと考えられる。つまり、3月5日は上昇したのではなく、3月4日に低下した後、急速に回復したという解釈が正しいかもしれない。また、これ以外の日においても $\pm 2\sigma$ を超える値が観測された日が施設C、および施設Dにおいて散発的に観測され、特に2011年2月18日には、施設Cにおいて -3σ を超える低下がみられた。その9日後には、施設Cが最も近い場所で Dobrovolsky radius condition を満たす M5.0 の地震が発生していた。東北地方太平洋沖地震の9日前に産卵率の低下がみられたという結果と時間差が一致しており、この低下は2011年2月18日に発生した地震に関連した現象かもしれない。また施設Dで

は $+2\sigma$ を超える値が複数現れていた。この上昇が現れた日の近くには対象とした地震活動は確認されておらず、地震以外の要因によるものと考えられる。

タイムラグの検証

各施設で発生した有感地震と産卵率の変動との明確なタイムラグが存在するかを検証するため、相互相関解析を用いて検証した結果、施設 B では 15 日前と 24 日前に、施設 D では 7 日前に係数が低くなっていたが、信頼区間を超える正の係数も複数確認された。また施設間で一致する結果は得られず、有感地震との明確なタイムラグを判断することはできなかった。

各施設において、 $M_{eff}5.0$ 以上、 5.5 以上、 6.0 以上、および 6.5 以上を観測した日と産卵率の変動とのタイムラグに関する検証では、施設 A における関連性が最も顕著であり、地震の 1 日前から 1 日後と、24 日前から 27 日前との関連性が高く、負の相関を示した。施設 B、C においても 24 日前に負の相関が、施設 D では 24 日前には有意な関連性は確認されず、27 日前に負の相関がみられ、どの施設においても一致しているようにみえた。また、施設間でばらつきはあるものの、地震当日から 11 日前には負の相関が多くみられた。産卵率の場合、鶏群で管理されたデータであるため、施設ごとでサンプル数は異なるが、1 日当たりに 1 から 5 個の数値データしかなく、個体ごとで管理される乳量に比べ地震以外の変動に大きく結果が左右される可能性がある。そのため、全ての施設において各条件の M_{eff} を超えた日との相互相関係数も算出した。その結果、7 日前と 24 日前から 27 日前に有意な相関が多くみられた。また、 $M_{eff}5.0$ 以上の日に比べ、 $M_{eff}6.5$ 以上の日の方が係数は低く、第三章 第一節の結果とも一致しており、 M がより高い地震、もしくは地震活動がより活発な日の方が、産卵率が低下しやすいか、産卵率の低下量が大きいことが示唆された。また、東北地方太平洋沖地震に関しては、7 日前と 9 日前に前兆と考えられる産卵率の低下が確認されたが、24 日前から 27 日前にかけては -2σ を超える低下はみられず、本解析結果と

一致しなかった。採卵鶏がどのような地震前兆現象に反応しているかは不明であるが、東北地方太平洋沖地震に関連した電離層における異常は、3月5日と6日に現れていたとの報告がされており、おおよそ産卵率の減少が現れた日と同様であったことから、この産卵率の低下は地震の前兆として現れた可能性は高い。24日前から27日前に明確な低下がなかった原因として、東北地方太平洋沖地震と、その後に発生した地震との間に何らかの地質学的、もしくは断層メカニズムに関する相違が考えられる。

地震のM、震源地からの距離、および深さと産卵率変動値の関連性

タイムラグの検証からも、地震によって産卵率が低下する先行期間は異なる可能性が高いと判断し、地震当日から11日前と24日前から27日前にかけての低下が顕著であったため、地震の1日前から27日前までの産卵率における最小値を従属変数として用いた。その結果、震源地からの距離とは正の相関を示し、震源地からの距離が近いほど産卵率は低下することが明らかとなった。これは東北地方太平洋沖地震の9日前に現れた結果と一致している。また、Mに関しては2次までの変数で有意であった。これは、約M5までは変動は著しくなく、M5以上から低下が始まっていることを示している。地震前兆現象と地震のM、震源地からの距離、および震源の深さとの関連性を示した報告は電離層の異常に関連したものが多く (Fujiwara *et al.*, 2004; Maekawa *et al.*, 2006; Němec *et al.*, 2008; Le *et al.*, 2011)、地震活動が活発なほど、Mが大きい地震ほど異常が大きいという報告や (Liu *et al.*, 2006; Maekawa *et al.*, 2006; Němec *et al.*, 2008)、震源が浅い地震ほど異常が大きいという報告 (Le *et al.*, 2011) がされているが、定量的な関連性を見出した報告は存在しない。また、地上で生じる地震前兆現象を統計的に証明した報告もほとんどなく、本研究は地上で観測される動物の異常から定量的な関連性を見出すことができた。しかし、回帰分析では震源の深さとの関連性はみられなかった。Leら (2011) は、電離層の異常は震源の浅い地震との間により強い関連性があることを報告されている。採卵鶏は、地震前兆に現れる何らか

の物理・化学的な異常や変化に反応していると考えられ、そのような地震前兆現象の源は地殻にかかる歪みや微小破壊であるため、震源が深い方が前兆現象も現れにくいと考えられたが、そのような結果は得られなかった。本調査では M や震源地からの距離との有意な関連性はみられたことから、産卵率の低下は震源の深さよりも、 M や震源地からの距離に強く依存していることが示唆された。

結論

採卵鶏における産卵率と地震との関連性を検証した結果、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の約1週間前に、震源地から390 km離れた施設において産卵率の低下がみられた。また、複数の地震との関連性を検証した結果、地震当日から27日前に産卵率が低下しやすく、特に24日前から27日前における低下が顕著であった。また、震源の距離が近いほど、地震の27日前までにおける産卵率変動値の最小値は低く、Mは約5から、高くなればなるほど27日前までにおける産卵率変動値の最小値は低くなることが明らかとなった。

総合考察

動物の行動変化による可能な地震の直前予測

これまでに、様々な種類の数多くの宏観異常現象が報告されてきた。その中で、客観的に評価できる数値として観測することが可能で、理論的に解釈できる現象は、専用の観測機器が開発され、現在では GPS 測位による断層のスロースリップの観測 (Hirose and Obara, 2005; Ozawa, 2014) や、電波の伝搬強度などを用いた電離層擾乱の観測 (Maekawa *et al.*, 2006; Némec *et al.*, 2008)、地中や大気中のラドン濃度観測 (Yasuoka and Shinogai, 1997; Planinic *et al.*, 2000) などが行われ、現在も研究が進められている。本研究で着目した動物の地震前兆的行動は、他の宏観異常現象とともに数多く報告されてきた現象の一つであるが、そのほとんどは地震の事後に調査された報告であり、現在でも逸話や迷信として取り扱われることが多い。動物が地震前兆的行動を示すメカニズムはいくつか推測され (Kirschvink, 2000; Grant *et al.*, 2011; Freund and Stolc, 2013)、あり得る現象と考えられつつある。しかし、動物は日々様々な刺激にさらされているため、どれが地震前兆なのかを特定することが難しく、事後調査結果として報告される地震前兆的行動の種類も様々である。1975 年に中国で発生した海城地震を除き、地震前兆的行動を用いて実際に予測に成功した例はなく、研究レベルでもこのような地震前兆的行動を捉えた例はほとんどない。

本研究は、動物から得られる行動を用いて地震を予測することができるかを検証するために行った。まず、第一章では、地震前兆的行動に関する情報を集めるとともに、具体的にどのような行動が最も多いのかを調査した。続く第二章では、第一章で最も多く報告された「落ち着きをなくす」行動に着目し、縦断的に観測を行った。さらに第三章では、より観測が簡便であり、ストレスを受けて変動する搾乳牛における乳量と、採卵鶏における産卵率に着目し、過去のデータから、地震との関連性を検証した。

第一章では、2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) が発生する前に、犬と猫を対象にして地震前兆的行動が現れたかどうかを調査した。その結果、震源地から数百 km 離れた地域からも前兆的行動があったとの報告があり、全体では犬において 18.7%、猫では 16.4%が地震の前に行動変化があったことがわかった。また行動変化のうち、

「落ち着きをなくす」行動がどちらの動物種でも最も多く報告された。このような結果を地震予知に活かすには二つの方法が考えられる。一つは、落ち着きをなくす行動を定量化し、長期間観測し続けて地震との関連性を検証することであり、もう一つは、飼育者の協力を得て同様なアンケートを、web を利用した投稿形式で長期間行い、発生した地震との関連性を検証することである。いつ発生するかわからない地震を予測するためには、観測対象は常に安定したものであることが望ましく、後者は多くの協力者が手作業で入力する必要があることから母数を安定させることは難しいと判断した。第二章では、前者を選択し、「落ち着きをなくす」行動を「行動頻度」として定量化し、約 1 年間、複数の動物種を対象にして地震との関連性を検証した。また、第一章では、前兆的行動の半数以上が地震発生の 24 時間以内に現れていたが、数日前における報告も存在したため、観測頻度は 1 日 1 回とした。その結果、供試した猫と亀において、M が大きい地震の約 1 週間前以内に行動頻度の増加がみられることがわかり、猫は 7 日以内、亀は 5 日以内に行動頻度の増加することが示唆された。供試した個体は限られており、期間も 1 年であることから検証に用いた地震の数は少ないが、地震の前兆として行動に変化が現れる個体が存在することを発見し、またその変化は数日前にも現れていることが明らかとなった。このような行動頻度は、さらに供試個体を増やし、より長期間観測することで、より明確な地震との関連性が明らかになるかもしれない。前兆現象を用いて地震を予測する場合、前兆現象が現れる距離が限られるため、多地点における観測が必須であり、これは動物を用いた場合も同様であると考えられる。また多くの物理・化学的現象はそれらを測定するために専用の機器が必要になるが、猫や亀の場合は既に多くの一般家庭で飼育されているため、行動頻度さえ簡便に測定できれば、有用な情報になる。第三章では、ストレスにより変動することが知られている搾乳牛の乳量と採卵鶏の産卵率に着目し、地震前兆として変化するかどうかを検証した。「東北地方太平洋沖地震」に先立って、乳量は 6 日前から、産卵率は 9 日前から減少していたことが確認された。さらに複数の地震との関連性を検証した結果、乳量は M の大きい地震の約 15 日以内に減

少することが明らかとなった。採卵鶏は乳量が減少するよりも早く約 27 日以内に減少することが明らかとなった。また、これらの変化は、地震を予測するために重要となる M や震源地からの距離との関連性もみられた。地震予知とは、いつ、どこで、どの程度の規模 (M) の地震が発生するかを予測することであり、このような関連性が明らかになったことは、将来の地震予知へ大きく貢献すると考えられる。

日本周辺には太平洋プレート、北アメリカプレート、ユーラシアプレート、およびフィリピン海プレートの 4 枚のプレートがあり、国内には数多くの活断層が確認されている (Maruyama *et al.*, 1997)。したがって、日本国内で地震が発生する可能性のある地域は非常に広範囲であり、このような地震の前兆を捉えるためには、多くの観測点が必要となる。本研究において、乳量や産卵率、それに猫などの行動も地震前兆として変化する可能性が示されたため、複数の動物種や観測手法から得られる情報を総合的に利用することができれば、多地点観測が現実的になる。また、Ogata (2013) は短期地震予測を行う場合、単一の地震前兆現象だけを利用した場合予測精度は低いが、複数の地震前兆現象を統合して予測した方が、より精度の高い地震予測が可能になると指摘している。

本研究では、採卵鶏における産卵率が最も早く、地震の約 1 ヶ月以内に減少し、次いで搾乳牛における乳量が約 2 週間以内に減少し、最後に犬や猫などの小動物の行動頻度が約 1 週間以内に増加することが明らかとなり、動物種によって異常が現れる期間は大きく異なることが示唆された。地震前兆現象としてよく知られる、電磁気学的現象やラドン濃度などもそれぞれ異常が現れる期間は異なっている (Maekawa *et al.*, 2006; Le *et al.*, ; 2011; Gregorič *et al.*, 2011; Ouzounov *et al.*, 2012; Silva *et al.*, 2013)。本研究において、動物の行動変化が地震前に現れることは統計的にある程度証明できたが、それぞれの観測期間中には地震に関連しない変動も複数みられた。このような地震に関係しない変動は、実際に地震を予測する際、誤報を生み出す危険性がある。したがって様々な動物種における異常を一元化するだけでなく、その他の現象の情報も合わせて一元化することができれば、このよう

な異常が現れる期間の相違を用いて、段階的により精度の高い地震の危険率を知ることができる。

地震前兆に現れる異常や変化に対する行動は、安全な場所へ移動し、自らの生命と種を保存する適応の一つと考えることができる。また、通常の行動範囲を超えて遠くまで移動するには多くのエネルギーを消費するため、繁殖行動や養育行動に費やすエネルギーも最小限に留めると考えられる。このように考えると、産卵率や乳量が減少することは地震前兆として自然な反応かも知れない。犬や猫の行動頻度も、限られたスペースで飼育されるため移動することができず、回避行動の結果として現れているのかもしれない。

鶏は、何日か卵を連産した後休産し、抱卵行動を行う (Bell and Freeman, 1971)。卵は抱卵が始まってから約 21 日後に孵化する。地震の約 4 週間以内に産卵をしないようにすれば、地震の前後に孵化することを防ぐことができる。鶏の祖先と考えられるセキショクヤケイの場合、年間 30~60 個しか産卵せず (田先, 1982)、この機能は種の保存のために重要かもしれない。地震前兆に現れる産卵率の低下は、産卵に費やされるエネルギー量を減らすことができるだけでなく、地震による卵や幼雛への被害を減らすことができるため、地震前兆として産卵を休止させる機能は、この点からも意義のある反応のようにみえる。

また、搾乳牛に関して、ストレス刺激により乳量が減少するとの報告が多いが、それらは乳汁の排出に必要なオキシトシンが、ストレス刺激への暴露によって十分に放出されない結果として現れる現象であり、乳房中に普段よりも多く乳汁が残されるのであって乳汁の生合成自体が減少しているわけではない。これは、捕食者などが近くにいた場合、安全な場所へ移動してから仔牛に再度授乳を行うことができるために適応した反応であると考えられる。

搾乳牛における乳量や採卵鶏における産卵率は、既に日本各地の牧場や養鶏場、公的機関で毎日記録されているため、多地点観測を実現させるために必要なことは、それらの情報を毎日一元化できるシステムを構築することであると考えられる。また、搾乳牛における乳量

や採卵鶏における産卵率に減少がみられた時、地域間での減少の度合いをみることでおよその震源位置を特定でき、推測される震源地に近い牧場や養鶏場における乳量や産卵率の減少度合いから、M を推測することもできると考えられる。

伴侶動物の行動変化は産業動物の変化よりも地震の間近になって現れるため、発生する日時をより正確に知ることができるかもしれない。産業動物における生産データと異なり、犬や猫など伴侶動物における行動は毎日測定することができない。地震の行動変化を自動的に測定できる手法を確立したとしても、人の手作業を全て省くことは困難であろう。搾乳牛における乳量や採卵鶏における産卵率は、日常的な作業のなかで自動的に行われている。つまり、地震予測のためではない。しかし、採卵鶏や搾乳牛などの毎日観測可能な生産データをもとに、特定地域において地震が発生する危険率が高まっているかどうかをある程度判断できる。そして異常がみられた際には、地震の 1 週間前から直前にかけて現れる犬や猫の行動変化に注意を払うという一連のシステムを作り上げることで、動物から得られる情報を最大限に利用した地震予測が可能になると考えられる。このような一連の流れを可能なものにするためには、産業動物における生産データの自動収集システムを築き、いざと言うときに、伴侶動物における行動変化を連続的に観測できる方法を考えなければならない。

本研究では、今後発生する大地震に備え、搾乳牛における乳量と採卵鶏における産卵率を毎日観測できるシステムを考案した。第三章ではまとまった過去数年分の生産データを協力機関から提供してもらい、過去に発生した地震との関連性を検証したが、様々な地域からの生産データを毎日収集するためには、手作業での収集は不可能であり、インターネットによる収集が妥当であると考えられる。そこで、本研究では、データを収集する PC を特定の場所に設置し、インターネットへの自動接続を可能にした状態で、市販のクラウドコンピューティングを用いたファイル同期ソフトウェア (suger sync, BB ソフトサービス株式会社, 東京) をインストールし、アカウントを設定した。次に、自動的に個別別乳量が記録される

システムを導入している一般の牧場の協力を得て、生産データの同期を試みた。まず、毎日の乳量データが記録される PC をインターネットへの自動接続を可能にした状態で、同様の同期ソフトをインストールし、別のアカウントを設定した。この同期ソフトを用いて、乳量データのファイルが格納されるフォルダをサーバーと同期させ、PC にあるハードディスク内のフォルダとも同期させた。なお、データを受信する側の PC では、閲覧のみの制限を設け、牧場内のオリジナルファイルを編集できないようにした。このような同期ソフトを用いれば、協力施設が多くても、各施設の生産データが更新されれば自動的に収集することが可能である。このシステムを用いて現在観測を続けている。

次に、伴侶動物における行動頻度を簡便に観測でき、多地点における飼育動物から得られるデータを収集することが可能な手法として、3 軸の加速度センサーが搭載された人用のワイヤレス活動量計 (Fit bit Zip; Fit bit, Inc.; USA) を利用した行動頻度の観測を考案した。この Fit bit Zip は、長さ 35.5 mm×幅 28 mm×厚さ 9.65 mm、重量は 8 g と軽量であるため、犬や猫の首輪に装着して行動頻度を測定できる。この機器は、PC との無線通信によってサーバーに行動データを自動的にアップロードされるようになっているため、様々な地域からの情報を毎日一元化することが容易にできる。本研究では飼育者からの協力を得て、実際に複数頭の猫にこの機器を装着し、現在も観測を実施している。このように自動化された観測方法でも人によるある程度の手作業は必要であるため、前述のように産業動物の生産データから地震が発生する危険性が高い場合、より注意深く観測を行うよう呼びかけることが、より現実的な地震の直前予測の手法であると考えられる。

また、地震前兆には、これまでも述べてきたように動物以外にも様々な物理・化学的現象における異常や変化が報告されており、特に電磁気学的異常に関しては、すでに異常がみられた際にそれらの情報を公開するサービスも行われている。電磁気学的異常には、VLF (very low frequency)・LF (low frequency) の電波伝搬異常から推測される電離層擾乱や OLR (outgoing long-wave-earth radiation) の放射異常などが報告され、化学物質における異

常としては、ラドン濃度に関する報告が多い。いずれの異常現象も動物と同様、先行期間は地震によって前後にばらつくが、ラドン濃度の異常は地震の 2 ヶ月前から観測された例もあり、前兆現象として最も早く現れる現象かもしれない。また、電離層の異常や OLR の異常は動物における行動変化と同様、約 1 週間以内に生じることが多い。日本では、1965 年から地震予知研究計画が始まり、多くの試みが行われてきたが、それでも現在地震を予測することは困難であるとされている。この困難を乗り越えるためには、様々な学術分野における学際的交流と、様々な地震前兆現象の一元化が不可欠であると考えられる。本研究を通して明らかになったことと、これまでの先行研究を踏まえ、可能な地震予測システムの構想図を Fig. 29 に示した。

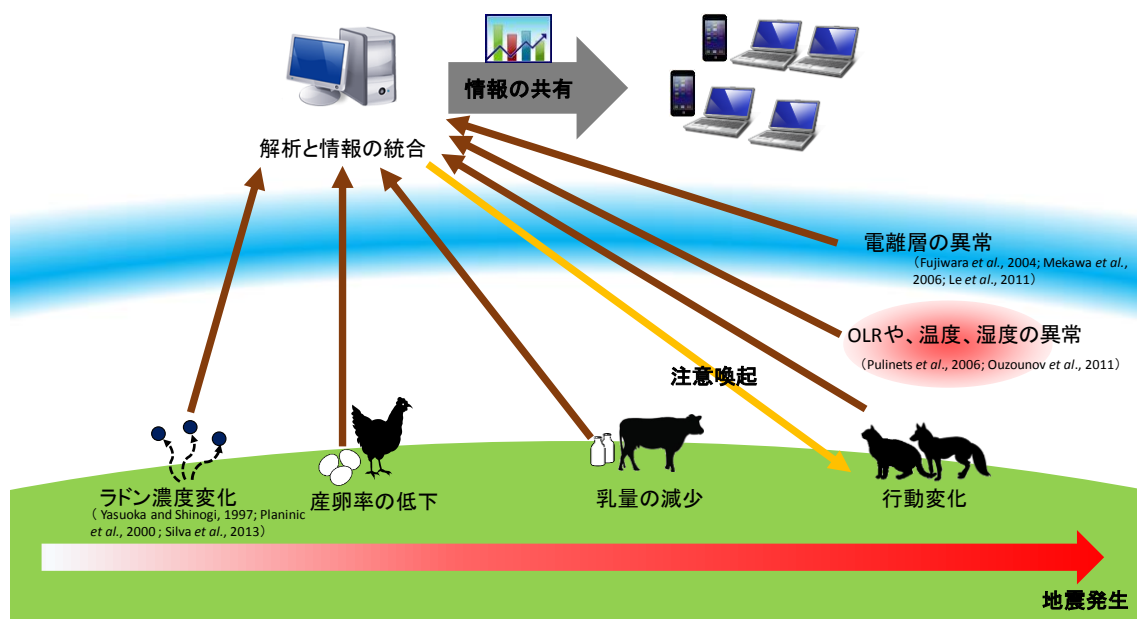


Fig. 29 可能な地震予測システムの構想図

現在、南海トラフで生じる地震が緊迫している。この南海トラフとは日本列島の太平洋側にあるプレートの沈み込み帯であり、静岡県から四国地方にまで伸びている。日本地震調査研究推進本部によって想定される震源域の中で、最も日本列島から離れた場所で地震が発生したとしても 200 km 以内に日本列島はある。また、東西方向に約 600 km 伸びており、

仮に地震が想定される最大規模の M9 であった場合、Mw9.0 の東北地方太平洋沖地震の前兆として、乳量は震源地から 340 km 離れた場所で、産卵率は 390 km 離れた場所で減少を示した。また伴侶動物の場合、調査では東北地方太平洋沖地震の震源地から数百 km 離れた場所でも犬や猫の行動変化が報告され、実験の結果、猫の行動頻度は観測地点から 310 km 以内で発生した M6 以上の地震の前に増加した。したがって、東海地方、近畿地方、四国地方に各 1 箇所ずつ観測点が存在すれば、前兆は捉えられる可能性は高い。

本論文の一部は、以下に公表した。

Yamauchi, H., Uchiyama, H., Ohtani, N., Ohta, M.: Unusual Animal Behavior Preceding the 2011 Earthquake off the Pacific Coast of Tohoku, Japan: A Way to Predict the Approach of Large Earthquakes. *Animals*, 4(2):131-145, 2014

謝辞

本研究の実施にあたり、終始懇切な御指導と御鞭撻を賜りました麻布大学獣医学研究 介在動物学分野 太田光明教授に、本学位論文の提出にあたりまして、ここに深く御礼申し上げます。

また、学位審査の副査をお引き受けいただきました麻布大学獣医学部動物応用科学科 滝沢達也教授、ならびに麻布大学獣医学部動物応用科学科 柏崎直巳教授に深く感謝いたします。

本研究にご協力いただきました麻布大学獣医学部動物応用科学科 田中智夫教授、麻布大学獣医学部動物応用科学科 植竹勝治教授、神奈川工科大学工学部機械工学科 矢田直之准教授、独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構 畜産草地研究所 斎藤幸生様、茨城県畜産センター 藤木美佐子様、神奈川県農業技術センター 畜産技術所 秋山清様、神奈川県農業技術センター 畜産技術所 引地宏二様、静岡県畜産技術研究所 佐野文彦様、静岡県畜産技術研究所 中小家畜研究センター 松井繁幸様、牧場および養鶏場の方々、ならびに本研究の調査にご協力いただきました株式会社 アイリスオーヤマの皆様と飼い主の皆様に、深く御礼申し上げます。

また、本研究の実施、また長期にわたる学生生活にあたり、様々なご支援をいただきました大谷伸代講師をはじめとしました麻布大学獣医学部 動物応用科学科 介在動物学研究室の皆様に深く感謝いたします。

最後に、私が麻布大学大学院 獣医学研究科において研究並びに学生生活を送るにあたり、終始見守り、支えていただいた両親に深く感謝いたします。

参考文献

1. Al-Saffar, A., Rose, S., 2002. Ambient temperature and the egg laying characteristics of laying fowl. *World's Poultry Science Journal*. 58, 317-331.
2. Barnett, J., Hensworth, P., Newman, E., 1992. Fear of humans and its relationships with productivity in laying hens at commercial farms. *British Poultry Science*. 33, 699-710.
3. Beadle, M., 1977. *The Cat: History, Biology, and Behavior*. Simon and Schuster, New York, USA.
4. Beaver, B.V., 2003. *Feline Behavior*. Elsevier Health Sciences, Philadelphia, USA.
5. Beaver, B.V., 2009. *Canine Behavior: Insights and Answers*. Elsevier Health Sciences, Philadelphia, USA.
6. Begall, S., Cerveny, J., Neef, J., Vojtech, O., Burda, H., 2008. Magnetic alignment in grazing and resting cattle and deer. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 105, 13451-13455.
7. Bell, D.J., Freeman, B.M., 1971. *Physiology and Biochemistry of the Domestic Fowl*. Academic Press, Inc., London, UK.
8. Bouraoui, R., Lahmar, M., Majdoub, A., Djemali, M., Belyea, R., 2002. The relationship of temperature-humidity index with milk production of dairy cows in a Mediterranean climate. *Animal Research*. 51, 479-492.
9. Buskirk, R.E., Frohlich, C., Latham, G.V., 1981. Unusual animal behavior before earthquakes: a review of possible sensory mechanisms. *Reviews of Geophysics*. 19, 247-270.
10. Casey, R., 2002. Fear and Stress, In: *BSAVA manual of canine and feline behavioural medicine*. (Eds.) by Horwitz, D., Mills, D., British Small Animal Veterinary Association, Guarantee, England, pp. 144-153.

11. Chen, A.T., Ouchi, T., Lin, A., Chen, J., Maruyama, T., 2000. Phenomena associated with the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan, possible precursors and after effects. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*. 11, 689-700.
12. Chen, C., Wen, S., Liu, J., Hattori, K., Han, P., Hobara, Y., Wang, C., Yeh, T., Yen, H., 2014. Surface displacements in Japan before the 11 March 2011 M9.0 Tohoku-Oki earthquake. *Journal of Asian Earth Sciences*. 80, 165-171.
13. Dey, S., Singh, R., 1999. Surface latent heat flux as an earthquake precursor. *Natural Hazards and Earth System Science*. 3, 749-755.
14. Dobrovolsky, I.P., Zubkov, S.I., Miachkin, V.I., 1979. Estimation of the size of earthquake preparation zones. *Pure and Applied Geophysics*. 117, 1025-1044.
15. Eftaxias, K., Kopanas, J., Bogris, N., Kaporis, P., Antonopoulos, G., Varotsos, P., 2000. Detection of electromagnetic earthquake precursory signals in Greece. Proceedings of the Japan Academy.Ser.B: *Physical and Biological Sciences*. 76, 45-50.
16. Fidani, C., 2013. Biological Anomalies around the 2009 L'Aquila Earthquake. *Animals*. 3, 693-721.
17. Fraser - Smith, A.C., Bernardi, A., McGill, P.R., Ladd, M.E., Helliwell, R.A., Villard, O.G., 1990. Low - frequency magnetic field measurements near the epicenter of the Ms 7.1 Loma Prieta earthquake. *Geophysical Research Letters*. 17, 1465-1468.
18. Freund, F., 2013. Earthquake forewarning—A multidisciplinary challenge from the ground up to space. *Acta Geophysica*. 61, 775-807.
19. Freund, F., Stolc, V., 2013. Nature of pre-earthquake phenomena and their effects on living organisms. *Animals*. 3, 513-531.
20. Fujiwara, H., Kamogawa, M., Ikeda, M., Liu, J., Sakata, H., Chen, Y., Ofuruton, H., Muramatsu, S., Chuo, Y., Ohtsuki, Y., 2004. Atmospheric anomalies observed during earthquake occurrences. *Geophysical Research Letters*. 31, L17110, doi:10.1029/2004GL019865. Available online: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2004GL019865/pdf> (accessed on 8 Jun 2014).

21. Ganesan, R., Dhanavanthan, P., Sreenivasaiyah, P., Ponnuvel, P., 2011. Comparative study of non-linear models for describing poultry egg production in Puducherry. *Current Biotica*. 5, 289-298.
22. Geller, R.J., 2011. Shake-up time for Japanese seismology. *Nature*. 472, 407-409.
23. Grant, R.A., Halliday, T., 2010. Predicting the unpredictable; evidence of pre - seismic anticipatory behaviour in the common toad. *Journal of Zoology*. 281, 263-271.
24. Grant, R.A., Halliday, T., Balderer, W.P., Leuenberger, F., Newcomer, M., Cyr, G., Freund, F.T., 2011. Ground water chemistry changes before major earthquakes and possible effects on animals. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 8, 1936-1956.
25. Gutenberg, B., Richter, C.F., 2010. Magnitude and energy of earthquakes. *Annals of Geophysics*. 53, 7-12.
26. Hamm, D., 1967. Sensory stress effects on layers. *Poultry Science*. 46, 1267.
27. Halász, N., 1990. *Vertebrate Olfactory System*. Akademiai Kiado, Budapest, Hungary.
28. Hart, B.L., 1977. Olfaction and feline behavior. *Feline Practice*. 7, 8-10.
29. Hayakawa, M., 2013. Possible Electromagnetic Effects on Abnormal Animal Behavior Before an Earthquake. *Animals*. 3, 19-32.
30. Hayakawa, M., Hattori, K., Ohta, K., 2007. Monitoring of ULF (ultra-low-frequency) geomagnetic variations associated with earthquakes. *Sensors*. 7, 1108-1122.
31. Hayakawa, M., Hobara, Y., Yasuda, Y., Yamaguchi, H., Ohta, K., Izutsu, J., Nakamura, T., 2012. Possible precursor to the March 11, 2011, Japan earthquake: ionospheric perturbations as seen by subionospheric very low frequency/low frequency propagation. *Annals of Geophysics*. 55, 95-99.
32. Heffner, H.E., 1998. Auditory awareness. *Applied Animal Behaviour Science*. 57, 259-268.

33. Heffner, H.E., Heffner, R.S., 2007. Hearing ranges of laboratory animals. *Journal of the American Association for Laboratory Animal Science*. 46, 20-22.
34. Heki, K., 2011. Ionospheric electron enhancement preceding the 2011 Tohoku - Oki earthquake. *Geophysical Research Letters*. 38, L17312, doi:10.1029/2011GL047908. Available online: <http://hdl.handle.net/2115/48572> (accessed on 2 February 2014).
35. Hirose, H., Obara, K., 2005. Repeating short-and long-term slow slip events with deep tremor activity around the Bungo channel region, southwest Japan. *Earth, Planets, and Space*. 57, 961-972.
36. Hoshihara, M., Iwakiri, K., Hayashimoto, N., Shimoyama, T., Hirano, K., Yamada, Y., Ishigaki, Y., Kikuta, H., 2011. Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake (Mw 9.0)-earthquake early warning and observed seismic intensity. *Earth, Planets and Space*. 63, 547-551.
37. Ikeya, M., 2004. *Earthquakes and Animals: From Folks Legends to Science*. World Scientific, Singapore.
38. Ikeya, M., Whitehead, N.E., 2013. Unusual Childhood Waking as a Possible Precursor of the 1995 Kobe Earthquake. *Animals*. 3, 228-237.
39. Karaman, S., Tarhan, S., Ergunes, G., 2007. Analysis of indoor climatic data to assess the heat stress of laying hens. *International Journal of Natural & Engineering Sciences*. 1, 65-68.
40. Keilis-Borok, V., Shebalin, P., Gabrielov, A., Turcotte, D., 2004. Reverse tracing of short-term earthquake precursors. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 145, 75-85.
41. Kirschvink, J.L., 2000. Earthquake prediction by animals: evolution and sensory perception. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 90, 312-323.
42. Krestel, D., Passe, D., Smith, J., Jonsson, L., 1984. Behavioral determination of olfactory thresholds to amyl acetate in dogs. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. 8, 169-174.
43. Le, H., Liu, J., Liu, L., 2011. A statistical analysis of ionospheric anomalies before 736 M6. 0 earthquakes during 2002–2010. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 116,

A02303, doi:10.1029/2010JA015781, Available online:

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2010JA015781/pdf> (accessed on 7 Jun 2014).

44. Li, Y., Liu, Y., Jiang, Z., Guan, J., Yi, G., Cheng, S., Yang, B., Fu, T., Wang, Z., 2009. Behavioral change related to Wenchuan devastating earthquake in mice. *Bioelectromagnetics*. 30, 613-620.
45. Lighthill, M.J., 1996. *A Critical Review of VAN: Earthquake Prediction from Seismic Electrical Signals*. World Scientific, Singapore.
46. Liso, d.G., Fidani, C., 2014. Seismic Precursory Phenomenology in Unusual Animal Behaviour in Val Pellice, Western Piedmont, in Comparison with Anomalies of Some Physical Parameters. *Open Journal of Earthquake Research*. 3, 30-42.
47. Liu, J., Chen, Y., Chuo, Y., Chen, C., 2006. A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly. *Journal of Geophysical Research*. 111, A05304, doi:10.1029/2005JA011333, Available online: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2005JA011333/pdf> (accessed on 7 Jun 2014).
48. Lott, D.F., Hart, B.L., Howell, M.W., 1981. Retrospective studies of unusual animal behavior as an earthquake predictor. *Geophysical Research Letters*. 8, 1203-1206.
49. Lott, D.F., Hart, B.L., Verosub, K.L., Howell, M.W., 1979. Is unusual animal behavior observed before earthquakes? Yes and no. *Geophysical Research Letters*. 6, 685-687.
50. Maekawa, S., Horie, T., Yamauchi, T., Sawaya, T., Ishikawa, M., Hayakawa, M., Sasaki, H., 2006. A statistical study on the effect of earthquakes on the ionosphere, based on the subionospheric LF propagation data in Japan. *Annales Geophysicae*. 24, 2219-2225.
51. Mashaly, M.M., Hendricks, G.L., 3rd, Kalama, M.A., Gehad, A.E., Abbas, A.O., Patterson, P.H., 2004. Effect of heat stress on production parameters and immune responses of commercial laying hens. *Poultry Science*. 83, 889-894.
52. McMillan, I., Gowe, R., Gavora, J., Fairfull, R., 1986. Prediction of annual production from part record egg production in chickens by three mathematical models. *Poultry Science*. 65, 817-822.

53. Nagao, M., Kawamura, H., Yamamoto, M., Ohuchi, A., 2004. Acquisition of personal tourism activity information based on GPS log mining method. *Proceedings of the Fifth Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference 2004*. 37, 1-16.
54. National Oceanic and Atmospheric Administration, 1976. *Livestock Hot Weather Stress*. Operations Manual Letter C-31-76. Department of Commerce, NOAA, National Weather Service Central Region, Kansas City, MO, USA.
55. Němec, F., Santolík, O., Parrot, M., Berthelier, J., 2008. Spacecraft observations of electromagnetic perturbations connected with seismic activity. *Geophysical Research Letters*. 35, L05109, doi: 10.1029/2007GL032517, Available online: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2007GL032517/pdf> (accessed on 7 Jun 2014).
56. Nikonov, A.A., 1992. Abnormal animal behaviour as a precursor of the 7 December 1988 Spitak, Armenia, earthquake. *Natural Hazards*. 6, 1-10.
57. North, M.O., 1984. *Commercial Chicken Production Manual*. AVI publishing Co. Ltd., New York, USA.
58. Ogata, Y., 2013. A Prospect of Earthquake Prediction Research. *Statistical Science*. 28, 521-541.
59. Ouzounov, D., Liu, D., Chunli, K., Cervone, G., Kafatos, M., Taylor, P., 2007. Outgoing long wave radiation variability from IR satellite data prior to major earthquakes. *Tectonophysics*. 431, 211-220.
60. Ouzounov, D., Pulinets, S., Romanov, A., Romanov, A., Tsybulya, K., Davidenko, D., Kafatos, M., Taylor, P., 2011. Atmosphere-ionosphere response to the M9 Tohoku earthquake revealed by multi-instrument space-borne and ground observations: Preliminary results. *Earthquake Science*. 24, 557-564.
61. Ouzounov, D., Pulinets, S., Hattori, K., Kafatos, M., Taylor, P., 2012. Atmospheric signals associated with major earthquakes. A multisensory approach, In: *The Frontier of Earthquake Prediction Studies*, (Ed.) by M. Hayakawa, Nihon-senmontosho-Shuppan, Tokyo, Japan, 510–531.

62. Ozawa, S., 2014. Shortening of recurrence interval of Boso slow slip events in Japan. *Geophysical Research Letters*. 41, 2762-2768.
63. Passe, D., Walker, J., 1985. Odor psychophysics in vertebrates. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. 9, 431-467.
64. Planinic, J., Radolic, V., Culo, D., 2000. Searching for an earthquake precursor: temporal variations of radon in soil and water. *Fizika B*. 9, 75-82.
65. Pulinets, S., Ouzounov, D., Karelin, A., Boyarchuk, K., Pokhmelnikh, L., 2006. The physical nature of thermal anomalies observed before strong earthquakes. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 31, 143-153.
66. Pulinets, S., Ouzounov, D., 2011. Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere Coupling (LAIC) model—An unified concept for earthquake precursors validation. *Journal of Asian Earth Sciences*. 41, 371-382.
67. Qidong, D., Pu, J., Jones, L.M., Molnar, P., 1981. A preliminary analysis of reported changes in ground water and anomalous animal behavior before the 4 February 1975 Haicheng earthquake, in: Simpson, D.W., Richards, P.G. (Eds.), *Earthquake Prediction: An International Review*. American Geophysical Union, Washington, DC, USA, pp. 543-565.
68. Reid, B., 1979. Nutrition of laying hens. *Georgia Nutrition Conference*, University of Georgia, Athens, Georgia, USA, pp. 15–18.
69. Rigalma, K., Duvaux-Ponter, C., Barrier, A., Charles, C., Ponter, A., Deschamps, F., Roussel, S., 2010. Medium-term effects of repeated exposure to stray voltage on activity, stress physiology, and milk production and composition in dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 93, 3542-3552.
70. Rikitake, T., 1978. Biosystem behaviour as an earthquake precursor. *Tectonophysics*. 51, 1-20.
71. Rikitake, T., 2003. *Prediction and Precursors of Major Earthquakes*. Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, Japan.

72. Rushen, J., de Passille, A.M.B., Munksgaard, L., 1999. Fear of people by cows and effects on milk yield, behavior, and heart rate at milking. *Journal of Dairy Science*. 82, 720-727.
73. Rushen, J., Munksgaard, L., Marnet, P., DePassillé, A., 2001. Human contact and the effects of acute stress on cows at milking. *Applied Animal Behaviour Science*. 73, 1-14.
74. Savegnago, R.P., Cruz, V.A., Ramos, S.B., Caetano, S.L., Schmidt, G.S., Ledur, M.C., El Faro, L., Munari, D.P., 2012. Egg production curve fitting using nonlinear models for selected and nonselected lines of White Leghorn hens. *Poultry Science*. 91, 2977-2987.
75. Sefton, A., 1976. The interactions of cage size, cage level, social density, fearfulness, and production of Single Comb White Leghorns. *Poultry Science*. 55, 1922-1926.
76. Sefton, A., Crober, D., 1976. Social and physical environmental influences on caged Single Comb White Leghorn layers. *Canadian Journal of Animal Science*. 56, 733-738.
77. Shebalin, P., Keilis-Borok, V., Zaliapin, I., Uyeda, S., Nagao, T., Tsybin, N., 2004. Advance short-term prediction of the large Tokachi-oki earthquake, September 25, 2003, M= 8.1 A case history. *Earth Planets and Space*. 56, 715-724.
78. Sheng, Z. Y., 1987. Medical Support in the Tangshan Earthquake: A Review of the Management of Mass Casualties and Certain Major Injuries. *Journal of Trauma-Injury Infection & Critical Care*. 27, 1130-1135.
79. Shier, D., Butler, J., Lewis, R., 2004. *Hole's Human Anatomy and Physiology*, 10th ed. McGraw-Hill, Boston, USA.
80. Silva, H.G., Bezzeghoud, M., Oliveira, M.M., Reis, A.H., Rosa, R.N., 2013. A simple statistical procedure for the analysis of radon anomalies associated with seismic activity. *Annals of Geophysics*. 56, R0106, doi:10.4401/ag-5570, Available online: <http://www.annalsofgeophysics.eu/index.php/annals/article/view/5570/6206> (accessed on 7 Jun 2014).
81. Singh, R.P., Senthil Kumar, J., Zlotnicki, J., Kafatos, M., 2010. Satellite detection of carbon monoxide emission prior to the Gujarat earthquake of 26 January 2001. *Applied Geochemistry*. 25, 580-585.

82. Timmons, M., Gates, R., 1988. Predictive model of laying hen performance to air temperature and evaporative cooling. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*. 31, 1503-1509.
83. Tosi, P., De Rubeis, V., Tertulliani, A., Gasparini, C., 2000. Spatial patterns of earthquake sounds and seismic source geometry. *Geophysical Research Letters*. 27, 2749-2752.
84. Tributsch, H., 1982. *When the Snakes Awake: Animals and Earthquake Prediction*. MIT Press, Cambridge, MA, USA.
85. Ulsoy, Ü., Ikeya, M., 2008. Retrospective Statements of Earthquake Precursors by Eye-Witnesses, in: Ulsoy, Ü., Kundu, K.H. (Eds.), *Future Systems for Earthquake Early Warning*. Nova Science Publishers, Inc., New York, USA, pp. 3-53.
86. Utsu, T., 1979. Calculation of the probability of success of an earthquake prediction (in the case of Izu-Oshima-Kinkai earthquake of 1978). *Report of Coordinating Committee for Earthquake Prediction*, 164-166.
87. Uyeda, S., Nagao, T., Orihara, Y., Yamaguchi, T., Takahashi, I., 2000. Geoelectric potential changes: possible precursors to earthquakes in Japan. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 97, 4561-4566.
88. Vitali, A., Segnalini, M., Bertocchi, L., Bernabucci, U., Nardone, A., Lacetera, N., 2009. Seasonal pattern of mortality and relationships between mortality and temperature-humidity index in dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 92, 3781-3790.
89. Walia, V., Virk, H.S., Yang, T.F., Mahajan, S., Walia, M., Bajwa, B.S., 2005. Earthquake prediction studies using radon as a precursor in NW Himalayas, India: a case study. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*. 16, 775.
90. Wang, K., Chen, Q., Sun, S., Wang, A., 2006. Predicting the 1975 Haicheng earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 96, 757-795.
91. Wattananikorn, K., Kanaree, M., Wiboolsake, S., 1998. Soil gas radon as an earthquake precursor: some considerations on data improvement. *Radiation Measurements*. 29, 593-598.

92. West, J., Mullinix, B., Bernard, J., 2003. Effects of hot, humid weather on milk temperature, dry matter intake, and milk yield of lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 86, 232-242.
93. Whitehead, N.E., Ulusoy, Ü., 2013. Macroscopic anomalies before the September 2010 M=7.1 earthquake in Christchurch, New Zealand. *Natural Hazards and Earth System Science*. 13, 167-176.
94. Whitehead, N.E., Ulusoy, Ü., Asahara, H., Ikeya, M., 2004. Are any public-reported earthquake precursors valid? *Natural Hazards and Earth System Science*. 4, 463-468.
95. Wood, P.D.P., 1967. Algebraic model of the lactation curve in cattle. *Nature*. 216, 164-165.
96. Yang, T., Fu, C., Walia, V., Chen, C., Chyi, L., Liu, T., Song, S., Lee, M., Lin, C., Lin, C., 2006. Seismo-geochemical variations in SW Taiwan: multi-parameter automatic gas monitoring results. *Pure and Applied Geophysics*. 163, 693-709.
97. Yasuoka, Y., Shinogi, M., 1997. Anomaly in atmospheric radon concentration: a possible precursor of the 1995 Kobe, Japan, earthquake. *Health physics*. 72, 759-761.
98. Yokoi, S., Ikeya, M., Yagi, T., Nagai, K., 2003. Mouse circadian rhythm before the Kobe earthquake in 1995. *Bioelectromagnetics*. 24, 289-291.
99. Zulovich, J., DeShazer, J., 1990. Estimating egg production declines at high environmental temperatures and humidities. *American Society of Agricultural Engineers Annual International Meeting*, Columbus, Ohio, USA.
100. 一般社団法人 ペットフード協会, 2013. 平成 25 年 全国犬猫飼育実態調査.
<http://www.petfood.or.jp/data/chart2013/index.html>
101. 地震調査研究推進本部, 2013. 「今後の地震動ハザード評価に関する検討～2013 年における検討結果～」.
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/13_yosokuchizu/index.htm.

102. 地震調査研究推進本部, 2014. 相模トラフ沿いの地震活動の長期評価 (第二版) について.
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/14apr_sagami/index.htm.
103. 田先威和夫, 1982. 新編養鶏ハンドブック. 養賢堂, 東京, 日本.
104. 戸田克史, 中井文徳, 家木一, 藤岡一彦, 渡辺裕恭, 井内民師, 寺田文典, 2002. 暑熱環境下における体感温度の上昇がホルスタイン種牛の乳量に及ぼす影響. *日本畜産學會報*. 73, 63-70.
105. 日本地震学会 地震予知検討委員会, 2007. 地震予知の科学. 財団法人 東京大学出版会, 東京, 日本.
106. 農林水産省 大臣官房統計部生産流通消費統計課, 2013. 平成 25 年畜産統計調査.
<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001115087>.
107. 山内寛之, 2011. 繰り返し電磁波照射による地震感知犬の作出に関する研究. 平成 22 年度 麻布大学修士論文 .
108. 力武常次, 2001. 地震予知一発展と展望一. 日本専門図書出版, 茨城, 日本..
109. 弘原海清, 1995. 前兆証言 1519. 東京出版, 東京, 日本.