



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	3D Tomography of Ionospheric Anomalies immediately before and after Large Earthquakes [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	Muafiry, Ihsan Naufal
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(理学)
Dissertation Number	甲第14645号
Issue Date	2021-09-24
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/83577
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Ihsan_Naufal_Muafiry_review.pdf, 審査の要旨



学 位 論 文 審 査 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（理 学） 氏 名 Ihsan Naufal Muafiry

審査担当者	主査	教 授	日 置	幸 介
	副査	教 授	古 屋	正 人
	副査	准教授	高 田	陽一郎
	副査	准教授	勝 俣	啓
	副査	教 授	中 谷	正 生（東京大学地震研究所）

学 位 論 文 題 名

3D Tomography of Ionospheric Anomalies immediately
before and after Large Earthquakes
(巨大地震直前直後の電離圏異常の三次元トモグラフィー)

博士学位論文審査等の結果について（報告）

申請者(I. N. Muafiry)の研究テーマは、三次元トモグラフィーによる大地震前後の電離圏異常の空間構造の解明である。このテーマは 2011 年 3/11 の東北沖地震後に指導教員（日置幸介）によって発表された、地震断層の付近の上空電離圏で電子数が地震約 40 分前から上昇を始めたという GRL 誌の報告(Heki, 2011)に由来する。この現象は日本列島に 1990 年代に整備された稠密 GNSS（全球衛星航法システム）網によって、人工衛星からのマイクロ波の位相の二つの周波数(1.2 GHz, 1.5 GHz)の間の差から電離圏全電子数(TEC)の形でとらえられたものである。最近数十年の間地震前兆研究に閉塞感が漂う中、一般に公開されているデータで誰でも検証できる地震前兆として世界に衝撃を与えた。

この発見は世界中の多くの研究者によって検証されたが、その結果これまでに 6 編の反対論文が出版され、それに対して発見を支持する 7 編の論文が発表されている。本学位論文の核となっているのは昨年 JGR 誌に出版された 8 編目の論文 (Muafiry and Heki, 2020)である。申請者は修士課程においてスボラディック E 層の三次元空間構造をトモグラフィーによって求める研究を行ったが、その経験を生かして東北沖地震前後の電離圏異常の三次元構造をトモグラフィーによって明らかにし、異常の原因となる物理過程を議論している。また東北沖地震の約一年前に発生したもう一つの M9 クラス地震である 2010 年マウレ地震（チリ）について、地震直前の電離圏異常について同様の三次元トモグラフィーによる研究を行って学位論文の一部としている。

三次元トモグラフィーは、観測量である衛星と受信機を結ぶ視線上の全電子数 (TEC) を入力データとして、震源上空を含む広範囲の超高層大気における電子密度異常の空間構造を、最小二乗法を利用して推定するものである。そこでは観測局の不足を補って推定を安定化するための様々な拘束条件の導入や、人工的に生成した入力データを用いて元のパターンが再現されるかの様々なテストを行うことによって、手法の信頼性を事前に確認している。

一連の計算の結果、東北沖地震の 40 分前に始まった正の電子密度異常は、海底下にある断層の直上で生じたのではなく、最寄りの陸域である東北地方陸域の真上（高度 300 km 付近）に発生していたという重要な事実を見出した。またそのさらに上空には負の電子密度異常が同時に成長していたこともわかった。申請者と指導教員が発表した論文 Muafiry & Heki (2020)の中では、地震断層におけるマイクロクラックから可動化した正孔(p-hole)が地表に

溜まり、それらが作る上向きの電場が電離圏電子を地球磁場に沿って下降させ、それによって電子密度の正と負の異常が生じるという仮説が提唱されている。本研究で明らかになった(1)電子密度異常が、電荷が安定に存在しやすい陸域の上に出たこと、(2)低い正の電子密度異常と高い負の異常がペアで生じたこと、はこの物理モデルと調和的である。

また申請者は、地震発生後に電離圏に到達した音波擾乱によって生じた電離圏の穴についても、その三次元構造をトモグラフィーで求め、陸域ではなく震源直上(海上)に発生していたことを突き止めた。これは地震直前に前兆として電磁気的な過程で生じる異常と、地震直後に力学的な過程で生じる異常のメカニズムが根本的に異なっていることを示す重要な結果である。反対論者がしばしば主張する、地震後の電離圏の穴の形成が地震前の見かけ上の電子数の増加をもたらしたという考え方を無効化する意義も持っている。

さらに申請者は、これまで地上局数が十分でないために三次元トモグラフィーが行われていなかった2010年マウレ地震(チリ中部)についても、同じ手法で地震直前の全電子数(TEC)の異常がどの領域の電子密度異常が作ったものなのかについて議論している。チェッカーボードパターンを仮定して生成した人為的なデータを用いた三次元トモグラフィーの結果、300 kmより高い高度の電離圏については、地上局の偏在のために電子密度分布を忠実に再現することが容易ではないことがわかった。それでも実際のデータを用いた結果によると、震源上空約300 kmの電離圏F領域に正の電子密度異常が生じていたことが見いだされた。また東北沖(Mw9.0)、マウレ(Mw8.8)に加えてHe & Heki(2018)で報告された2015 Illapel地震(Mw8.3)の三つに事例を比較し、それぞれの地震直前の電子密度異常について、地震の大きさと電子密度異常域の空間的な広がりや異常の強さなどの関係について現在の知見が学位論文中でまとめられている。

これらの研究成果は地震直前に生じる電離圏の異常について我々の理解を大きく深めるものであり、地震学的、超高層大気物理学的に重要な意義を持つものである。よって著者(主査)は、申請者のIhsan Naufal Muafiry氏が北海道大学博士(理学)の学位を授与される資格あるものと認める。