

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 23 日現在

機関番号：53301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2023

課題番号：17K06478

研究課題名（和文）宇宙の渚の構造を地上定常計測から推定する手法開発とその技術伝承

研究課題名（英文）Development of a method for estimating the lower ionosphere from ground-based observations and passing on the technology

研究代表者

深見 哲男（Fukami, Tetsuo）

石川工業高等専門学校・電気工学科・客員研究員

研究者番号：60115269

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,800,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙の渚と呼ばれる高度約200km以下の下部電離層は、衛星周回軌道より低く気球到達より高い高度にある。そこで、定常的には地上から電波により世界中で観測している。日本では、現在、情報通信研究機構が、国分寺などの国内4か所において15分毎に定常観測している。この地上定常観測から得られるデータをイオノグラムという。イオノグラムは、パルス電波を打ち上げ、エコー波強度の時間遅れの周波数特性を計測した特性図である。しかし、イオノグラムの一部分しか現在利用されていない。本研究では、イオノグラム全体から下部電離層の電子密度分布を精密推定する手法を世界で初めて開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙の渚は、21世紀の現在、災害などの非常事態が発生した時も含め重要な放送波である中波・短波ラジオ、長波を利用する電波時計に大いに利用されている。この宇宙の渚の電子密度分布は、昼と夜では数十倍以上と大きく変化している。この変化が短波帯までの周波数領域の電波の反射などに多大な影響を与える。学術的意義として、この電波利用計画の基礎となる国際標準電離層モデルをイオノグラムという定常観測資料により常時改善が可能となることに貢献することである。そして、社会的意義は、国民の重要な財産である電離層反射を利用した広域ラジオ放送やシステムの利活用に貢献することである。

研究成果の概要（英文）：It is difficult to investigate the lower ionosphere directly as the altitude is lower than satellite orbit and higher than balloon. Therefore, observations are regularly made from the ground by radio waves all over the world. In Japan, government agencies are currently conducting regular observations every 15 minutes at four locations, including Kokubunji. The data obtained from these ground-based observations is called an ionogram. The ionogram is made by pulse wave intensities of the ionosonde and shows frequency characteristics of the virtual height calculated by time delay of the pulse wave received after traveling in the ionosphere. So, the ionograms have information of both virtual heights and reflection coefficients on observation frequencies. However, only a few data in the ionogram are currently available. In this study, we developed the world's first method to accurately estimate the electron density distribution of the lower ionosphere from the entire ionogram.

研究分野：電波工学

キーワード：計測工学 宇宙の渚 下部電離層 イオノグラム シミュレーション工学

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 研究対象の宇宙の渚と呼ばれる下部電離層は、高度 60km ~ 200km 程度の領域であり、高度 80km 程度以下の D 層、高度 100km 程度に電子密度の極大値をもつ E 層、最大電子密度を持つ F 層の下部で構成される。F 層以上から磁気圏に至る上部電離層は人工衛星による定常観測が可能であり、現在も多くの研究がなされている。しかし、200km 程度以下の下部電離層は、衛星軌道高度からは、F 層の高い電子密度でマスクされる。また、気球による観測は高度 50km 以下であり、直接的な計測として探査ロケットがあるが局所的であり、下部電離層の定常的な直接観測はできない。そこで下部電離層の定常的な遠隔測定として、独立行政法人情報通信研究機構のイオノゾンデがある。イオノゾンデは、垂直上空に放射するパルスレーダから得られる見かけ高度(反射波の到来遅延時間)の周波数特性、いわゆるイオノグラムを計測している。15 分毎に定常観測されたイオノグラムは、ホームページ[ ]で公開されている。しかし、この見かけ高度は、実際の反射高度を表していない。すなわち、イオノグラムから電子密度の高度分布を推定する技術は、確立していない。

(2) これに対し 1975 年に電離層の電子密度分布と衝突回数分布が分かれば電離層中の電磁界や反射係数を算出できる Full wave 計算法が開発された[ ]。1996 年、研究代表等は Full wave 計算法を応用することによりイオノグラムの見かけ高度計算法を開発した[ ]。この見かけ高度計算法を使えば、イオノグラムから電子密度の高度分布を推定することが可能である。

(3) 2012 年日本で発生した金冠日食の時、下部電離層を調べるため、500kHz ~ 1500kHz の中波放送を石川県で強度観測した結果、金冠日食の観測において、一部の中波放送局のみが日食時に強度測定できた[ ]。この原因となる下部電離層の状態を解析する必要がある。そのため、まず、日没・日出時における国際標準電離層(IRI) [ ]を用いて Full wave 計算した理論値と中波放送波の観測値を比較したが、IRI が日没・日出時の中波強度観測値を説明できないことが分かった[ ]。この IRI の高度 100km 程度以下の E 層下部から D 層の領域は、1995 年モデルを用いており、近年研究は国際的に進展していないことが分かった。理由の一因として、この領域を研究する研究者が、非常に少ないことが起因していると思われる。

### 2. 研究の目的

国が提供しているイオノグラム等の下部電離層反射波を定常的に地上計測した資料を用いて、下部電離層電子密度分布を推定する手法を開発し、国の提供する資料を国民に有効利用してもらう。また、日食時の下部電離層の状態を推定する。そして、研究を通して、機器開発のノウハウと Full wave 計算法とその応用を伝授し、下部電離層の研究者を育成することを目的とする。

### 3. 研究の方法

(1) 基本的には、国が提供する定常観測のイオノグラム資料等から下部電離層を推定することが主目的であるが、下部電離層の研究者の育成を含めて、放送などの公共電波を用いた下部電離層反射波の測定装置を試作する。

(2) 国が提供するイオノグラム資料から、開発した見かけ高度計算法により電子密度の高度分布を求める手法を開発する。

(3) 試作した中波放送の電離層反射波の観測装置を用いて、日食観測から下部電離層の状態を推定する。

### 4. 研究成果

(1) イオノグラム資料から下部電離層電子密度分布の推定[ , ]

まず、開発した見かけ高度計算法の有効性をロケット実験から確かめた[⑦]。つまり、鹿児島県内之浦から 1982 年 2 月 13 日に打ち上げられた K-9M-72 探査ロケット実験において、電子密度と 8MHz 短波強度の高度分布が観測される一方、発射地点におけるイオノグラムを同時観測した。これらの観測データとイオノグラムから推定した電子密度分布を比較することで、見かけ高度計算法の有効性を得た。

次に、独立行政法人情報通信研究機構から公

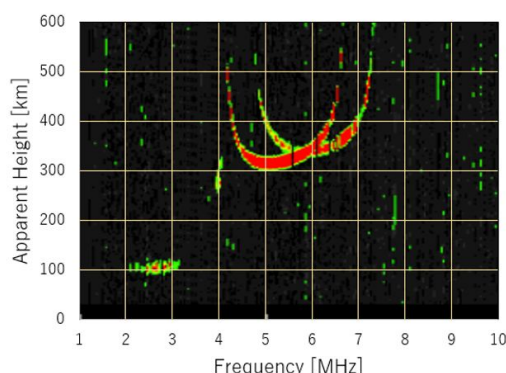


図 1. Measured Ionogram at Kokubunji in Japan (2017/05/20 15:00 JST)

開されているイオノグラムを用いた下部電離層電子密度の分布の推定法を開発した[⑧]。図 1 に 2017 年 5 月 20 日 15:00 JST に国分寺で観測されたイオノグラムを示す。縦軸の見かけ高度  $h'$  は、地上で発射されたパルス電波が電離層で反射して地上に到達するまでの時間を光速( $3 \times 10^8$  m/s)で伝搬するとして見積もった反射高度である。実際には電離層中の速度は光速より遅くなるので、見かけ高度計算法が必要になる。この見かけ高度計算法を用いて、電子密度分布を推定するために図 2 の推定アルゴリズムを用いる。推定するため、まず衝突回数の高度分布と初期電子密度分布として同地・同時刻の国際標準電離層(IRI)を与える。これを Full wave 計算し、特性波である正常波(O 波)と異常波(X 波)の反射係数の大きさ  $R$  と位相  $\phi$  を得る。この位相  $\phi$  を角周波数  $\omega$  で差分することにより各特性波の見かけ高度を計算する。図 1 のように電離層反射波が観測される条件を今回は単純に  $R$  が 0.01 以上であるとして、観測イオノグラムと計算イオノグラムを比較し、両者が合うように修正して電子密度分布を推定した。図 3 (a) は、IRI の電子密度分布と修正推定した電子密度分布を示している。図 3 (b) は、IRI による計算イオノグラムと背景に図 1 の観測イオノグラムを示しており、両者比較すると、周波数 2MHz 以下と 3 ~ 5 MHz において合っていないことが分かる。図 3 (c) は、推定した電子密度分布を用いた計算イオノグラムであり観測とよく合っていることが分かる。

この推定では伝搬距離に関係なく反射波が観測される条件を  $R=0.01$  としたが、実際は伝搬距離によって観測条件は異なり[⑨]、今後の課題となる。

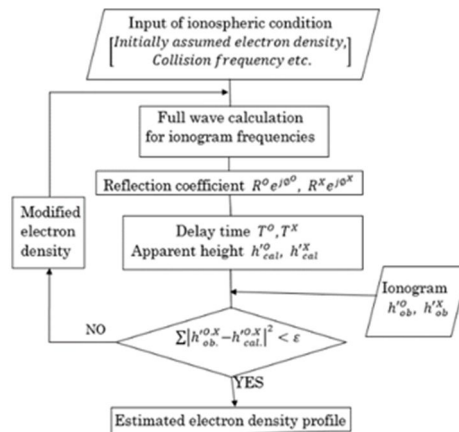


図 2 . Estimation algorithm

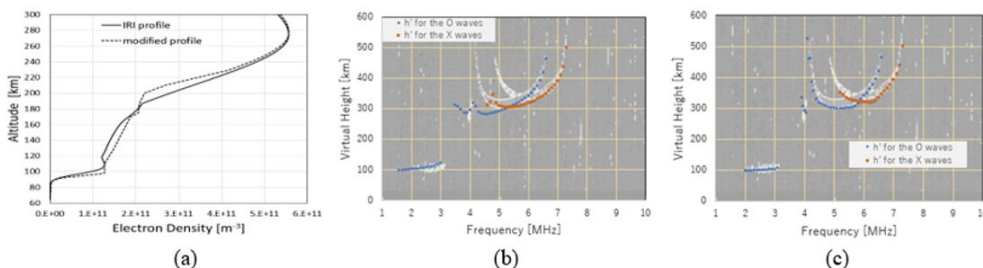


図 3 . An estimation example ((a) the IRI electron density profiles and the modified profile, (b) the ionogram for the IRI profile and the observed ionogram, (c) the ionogram for the modified profile and the observed ionogram).

## (2) 金環日食と部分日食における中波放送波の強度観測の比較[ ]

まず、研究費を用いて制作した中波放送波の観測装置[ ]を用いて、2019 年 1 月 6 日の部分日食を石川県津幡で中波放送波の強度を観測した。そして 2012 年 5 月 21 日の金環日食の強度観測[ ]と比較した。図 4 は両観測の日食の最大時刻を基準とした福井県敦賀における大気外での太陽強度の変化である。敦賀は大阪の送信局と津幡の受信点の中央地点に当たる。また太陽定数を一定として計算してある。両者を比較すると日出から同じように太陽光が増加し、日食最大時刻に対して約 1 時間前から日食が始まり約 1.4 時間後には終わっていることが分かる。そして、金環日食の太陽強度は、日食最大時刻において、部分日食に比べ非常に低下していることが分かる。下部電離層の D 層は太陽強度に依存し、太陽光が強ければ、中波の電離層反射波の減衰は大きいはずである。

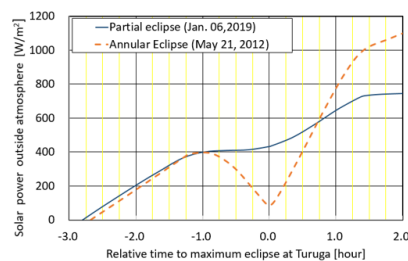


図 4 . Solar power outside the atmosphere in Tsuruga using the solar constant of 1367 W/m<sup>2</sup> (The horizontal axis is the time based on the maximum shading time).

津幡における金環日食の測定結果を図 5 に、部分日食の観測結果を図 6 にそれぞれ示す。どちらも地上での垂直電界の強さを測定している。両図の説明として中波放送局は、9kHz 毎に置局され、観測されると両図に示すように線となって表示される。搬送波送信強度は一定であるが、音声信号の側波帯強度のため受信強度は少し変動する。夜間、電離層反射波が受信された遠方の局は、日出に伴い減衰していくのが両図から分る。それに対し、近郊の局である 1107, 1224, 1386[kHz] (金沢の局), 648, 738 [kHz] (富山の局)は、観測期間、安定に常時受信されるので強度校正に用いる。図 5 の金環日食が月曜日であり、図 6 の部分日食は日曜日であったためか、放送波がない部分の雑音レベルが図 6 の部分日食の方が低いことが分かる。両図とも日出と共に電離層反射波の強度が減少した。そして、日食最大時刻を矢印で示してあるが両図

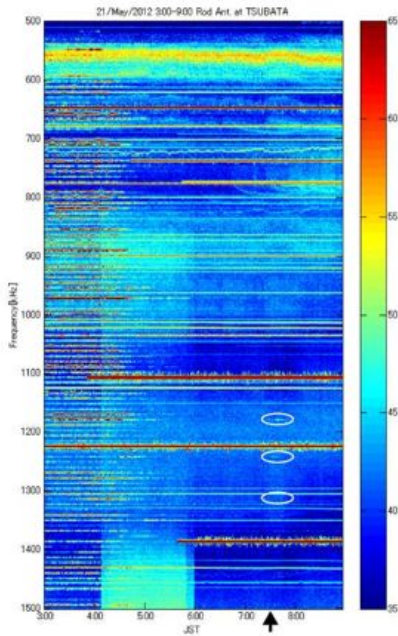


図5. Field intensities on the annual solar eclipse (The black arrow indicates the maximum solar eclipse).

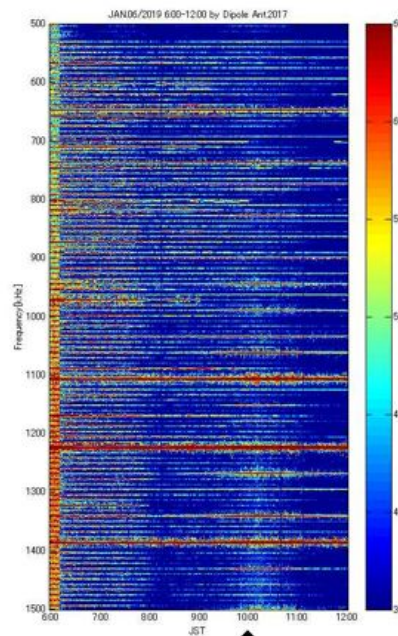


図6. Field intensities on the partial solar eclipse (The black arrow indicates the maximum solar eclipse).

とも日食付近で電離層反射放送波の強度が上昇していることが分かる。図5の金環日食では、図中に○枠で示した大阪からの1179, 1314[kHz]と木更津からの1242[kHz]のみが顕著に観測されたが、図6の部分日食では、日射量が多いにもかかわらず驚くべきことに、多くの局が観測されていることが分かる。原因の一つとして、部分日食に比べて金環日食は、日食時の日射量の変化が大きく伝搬路が形成されなかった可能性はある。それならば、両者ともに伝搬路が形成されていると思われる大阪の送信局について違いを更に調べると、金環日食時には周波数が低い大阪の666, 828[kHz]は観測されなかったが、部分日食時には観測された。

他の原因となる両観測の違いとして太陽黒点数Rがある。金環日食ではR=103であり、部分日食ではR=0であった。下部電離層のE層とF層の電子密度分布は、太陽黒点数に関係している。単純に下部電離層のD層にも同じ関係が成立する仮定するとして図4の太陽強度を $(1+0.01R)$ 倍すると図7となる。この仮定によれば、金環日食の強度は、部分月食に比べて日出後急激に減衰する。中波のより低い周波数は、D層により影響を受けやすいので、金環日食の666, 828[kHz]は観測されなかったのではないと思われる。

イオノグラムの最低観測周波数も太陽黒点数に影響している[ ]、しかし、国際標準電離層(IRI)は太陽黒点数によるD層の変化はない。D層が太陽黒点数にどの程度影響するかは今後の課題である。

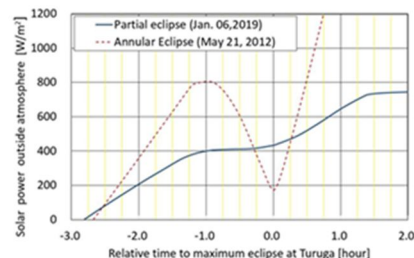


図7. Solar power outside the atmosphere in Tsuruga using the solar constant of  $1367(1+0.01R)$  W/m<sup>2</sup>.

#### < 引用文献 >

- ① 独立行政法人情報通信研究機構：http://wdc.nict.go.jp/IONO/HP2009/ISDJ/index.html
- ② Nagano, M. Mambo, G. Hutatsuishi: Numerical calculation of electromagnetic waves in an anisotropic multilayered medium, Radio Science, vol.10, no.6, pp.611-617 (1975.6)
- ③ T. Fukami, I. Nagano, J. MacDougall: A new method obtaining the ionograms from the electron density and the collision frequency profiles in the lower Ionosphere, Proceeding of 1996 International Symposium on Antennas and Propagation, pp.685-688 (1996.9)
- ④ 深見哲男, 長野勇, 中島一茂: 金冠日食時の中波放送波の観測. 第132回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, B005-37(2012.10)
- ⑤ 国際標準電離層(IRI): http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri\_vitmo.html
- ⑥ 深見哲男, 長野勇, 東亮一: 電離層D領域と中波地上観測受信強度の比較(金冠日食時の中波観測を含む), 第6回電磁圏物理学シンポジウム(2014.3)
- ⑦ 深見哲男, 長野勇, 東亮一: Estimation of Electron Density Profile in the Lower Ionosphere from Ionogram Data by the Full Wave Method, Proceedings of 2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium, pp.2129-2133 (2018.8)DOI: 10.23919/PIERS.2018.8597688
- ⑧ 深見哲男, 長野勇, 東亮一: Modification of the IRI Electron Density Profile from an Observation

Ionogram using the Full Wave Method in the Lower Ionosphere , Proceeding of 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium - Spring, pp.2764-2767 (2019.6) DOI: 10.1109/PIERS-Spring 46901.2019.9017241

⑨ 深見哲男, 長野勇, 東亮一: イオノグラムから下部電離層の推定法の改善, 令和5年度ジオスペースの低エネルギープラズマ研究集会(2024.2)

⑩ 深見哲男, 長野勇, 東亮一: Observation of the MF Broadcasting Wave Intensities on the Solar Eclipse , XXXIV General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI2021) , (Sep.4,2021) , DOI: 10.23919/URSIGASS51995.2021.9560335

⑪ 深見哲男, 東亮一, 南瑞穂: 中波放送波帯の石川高専における電磁環境観測 - 宇宙の渚の総合観測を目指して - , 石川工業高等専門学校紀要 ,50,pp.1-4(2018.3)DOI:10.20763/inctkiyoupre.50\_KJ00005074803

深見哲男, 長野勇, 東亮一: 金冠日食時における中波放送波強度の観測, 映像情報メディア学会誌 , 72 , 4 , pp.J73-75 ( 2018.3 ) DOI:10.3169/itej.72.J73

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Fukami Tetsuo, Higashi Ryoichi, Nagano Isamu	4. 巻 1
2. 論文標題 Observation of the MF Broadcasting Wave Intensities on the Solar Eclipse	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 XXXIV General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI2021)	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/URSIGASS51995.2021.9560335	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 深見哲男, 東亮一	4. 巻 1
2. 論文標題 Observation of the UHF TV Duct over the Japan Sea	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of 2020 International Symposium on Antennas and Propagation	6. 最初と最後の頁 301-302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/ISAP47053.2021.9391381	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 深見哲男, 長野勇, 東亮一	4. 巻 1
2. 論文標題 Modification of the IRI Electron Density Profile from an Observation Ionogram using the Full Wave Method in the Lower Ionosphere	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceeding of 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium - Spring	6. 最初と最後の頁 2764-2767
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/PIERS-Spring 46901.2019.9017241	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 深見哲男, 長野勇, 東亮一	4. 巻 1
2. 論文標題 Estimation of Electron Density Profile in the Lower Ionosphere from Ionogram Data by the Full Wave Method	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of 2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium	6. 最初と最後の頁 2129-2133
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/PIERS.2018.8597688	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 深見哲男, 長野勇, 東亮一	4. 巻 72
2. 論文標題 金冠日食時における中波放送波強度の観測	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 映像情報メディア学会誌	6. 最初と最後の頁 J73-J75
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3169/itej.72.J73	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 深見哲男, 東亮一, 南瑞穂	4. 巻 50
2. 論文標題 中波放送波帯の石川高専における電磁環境観測 - 宇宙の渚の総合観測を目指して -	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 石川工業高等専門学校紀要	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20763/inctkiyoupre.50_KJ00005074803	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 深見哲男, 長野勇, 東亮一
2. 発表標題 イオノグラムから下部電離層の推定法の改善
3. 学会等名 令和5年度ジオスペースの低エネルギープラズマ研究集会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 深見哲男, 長野勇, 東亮一
2. 発表標題 イオノグラムから下部電離層電子密度の推定
3. 学会等名 2024年電子情報通信学会総合大会, C-1-15
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 東亮一, 深見哲男
2. 発表標題 日本海上における異常伝搬のレイトレーシングおよびドローンによる高層気象データ観測の検討
3. 学会等名 2024年電子情報通信学会総合大会, B-1A-11
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 深見哲男, 長野勇, 東亮一
2. 発表標題 Development of ionospheric electron density profile estimation method from ionogram
3. 学会等名 ジオスペースの低エネルギープラズマ研究集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 深見哲男, 長野勇, 東亮一
2. 発表標題 Comparison of MF broadcasting wave intensities during annular solar eclipse and partial solar eclipse
3. 学会等名 ジオスペースの低エネルギープラズマ研究集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 深見哲男, 長野勇, 東亮一
2. 発表標題 Estimation Technique of Electron Density Profile from Ionogram Using the Full Wave Method
3. 学会等名 XXXIV General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 深見哲男, 東亮一
2. 発表標題 Observation of the UHF TV Duct over the Japan Sea
3. 学会等名 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP-2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年 ~ 2021年

1. 発表者名 深見哲男, 長野勇, 東亮一
2. 発表標題 Estimation Technique of Electron Density Profile from Ionogram Using the Full Wave Method
3. 学会等名 XXXIV General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 深見哲男, 長野勇, 東亮一
2. 発表標題 Observation of the MF Broadcasting Wave Intensities on the Solar Eclipse
3. 学会等名 XXXIV General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 深見哲男, 長野勇, 東亮一
2. 発表標題 Modification of the IRI Electron Density Profile from an Observation Ionogram Using the Full Wave Method in the Lower Ionosphere
3. 学会等名 Progress in Electromagnetics Research Symposium 2019 in Rome (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 深見哲男, 東亮一, 長野勇
2. 発表標題 2019年1月6日の部分日食における中波放送波強度観測
3. 学会等名 2019年度電気・情報関係学会北陸支部連合大会C1
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 深見哲男, 長野勇, 東亮一
2. 発表標題 イオノグラムから電子密度分布のfull wave計算による推定手法
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第146回講演会R005-P12
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 深見哲男, 長野勇, 東亮一
2. 発表標題 日食における中波放送波強度の観測
3. 学会等名 電子情報通信学会2020年総合大会B-1-9
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 深見哲男, 長野勇, 東亮一
2. 発表標題 Estimation of Electron Density Profile in the Lower Ionosphere from Ionogram Data by the Full Wave Method
3. 学会等名 Progress in Electromagnetics Research Symposium 2018 in Toyama, 4P0-21 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 深見哲男, 長野勇, 東亮一
2. 発表標題 IRIモデルによる理論イオノグラムと観測との比較
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 第144回講演会R005-P23
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 深見哲男, 長野勇, 東亮一
2. 発表標題 中波放送波強度の金冠日食と日没日出特性の比較
3. 学会等名 2017年映像情報メディア学会年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 深見哲男, 長野勇, 東亮一
2. 発表標題 イオノグラムから電子密度のFull waveを用いた推定
3. 学会等名 プラズマ圏の観測とモデリング研究集会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

#### 6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	東 亮一  (Higashi Ryoichi)  (10435422)	石川工業高等専門学校・電気工学科・教授   (53301)	

#### 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------