

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月20日現在

機関番号：82642  
 研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2009～2011  
 課題番号：20740357  
 研究課題名（和文） デジタル受信機を用いたパッシブレーダーによるプラズマバブル広域監視法の研究開発  
 研究課題名（英文） Development of wide-area plasma bubble monitoring by a passive radar technique with digital radio receivers  
 研究代表者  
 齋藤 享 (SAITO SUSUMU)  
 独立行政法人電子航法研究所・航法システム領域・主任研究員  
 研究者番号：40392716

研究成果の概要（和文）：パッシブレーダー技術を用いて短波放送波の伝播距離を測定する装置を、デジタルソフトウェア受信機を利用して開発した。開発した装置を用いて豪州から赤道を越えて日本へ伝播する短波放送波の伝播遅延から伝播距離を測定し、同時に方向探査装置によりその到来方向を測定する実験を行った。伝播距離と到来方向の同時測定により、プラズマバブルの位置推定精度を高め、その発生を広域で効率的に監視することができる見通しを得た。

研究成果の概要（英文）：A system to measure the propagation distance of HF broadcast radio waves was developed with digital software radio receivers by utilizing a passive radar technique. The propagation time of HF broadcast radio waves from Australia to Japan across the magnetic equator was measured by the system to derive propagation distance. Arrival angles of the radio waves were measured simultaneously by an HF direction finder. It was suggested that more accurate position estimation of plasma bubbles and an effective wide-area monitoring system of plasma bubbles would be achievable by measuring the distance and arrival angle of trans-equatorial HF radio wave propagation simultaneously.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	2,600,000	780,000	3,380,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・超高層物理学

キーワード：地球惑星電離圏、電波伝播、プラズマバブル、短波赤道横断伝播、デジタル受信機、パッシブレーダー、衛星航法

1. 研究開始当初の背景

GPS等を用いた衛星航法において、電離圏プラズマの存在は最大の測位誤差要因である。衛星航法の航空利用(運輸多目的衛星補強システム:MSAS、地上型補強システム:GBAS)において、プラズマバブルに伴う電離圏全電子数の局所変動の検知は重要な問

題である。現状では、プラズマバブルの存在を検知できないため、安全マージンを取らざるを得ず、より高度な利用の障害となっている。従って、その発生、移動を監視、予測することは、衛星航法の高度利用にとって非常に有益である。

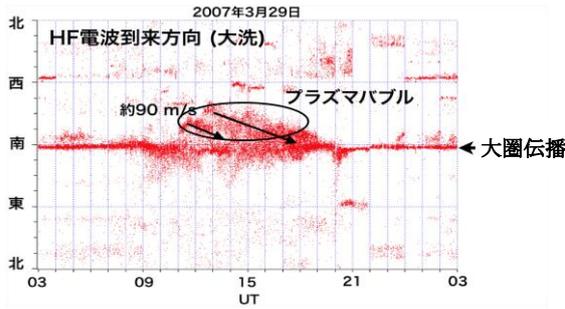


図 1. 情報通信研究機構大洗テストフィールドにおける Radio Australia 放送波到来方向の観測例[参考文献 2]。到来方向が左図内に点線で示す大圏方向から大きく外れ、西から東へ移動する様子がわかる。

短波赤道横断伝搬は赤道域大規模電離圏構造を観測するために古くから用いられてきた[参考文献 1]。短波赤道伝搬観測は、レーダー、光学観測等の手法に比べ、洋上を含む広い範囲を一度に観測できるという優位性を持つ。本研究代表者らの最新の短波到来方向探査装置を用いた観測結果(図1)では、短波赤道横断伝搬に見られる夜間の非大円伝搬がプラズマバブルに対応することが発見され、その移動速度を見積もることができた[参考文献 2]。しかしながら、赤道横断伝搬の到来方向測定には精度の面で限界があり、短波電波到来方向探査観測はプラズマバブルの観測手法として有効であるが、位置、速度の測定誤差が大きい。プラズマバブルの位置、速度をより正確に推定するためには、反射点の位置を正確に決定する必要がある。このためには伝播路長を測定し、伝播路を絞り込むことが必要である。

近年、放送波を電波源として用いた測距法(パッシブレーダー)が注目されており、米国では FM 放送波を用いたオーロラに伴う電離圏不規則構造の観測が行われている[参考文献 3]。この手法は、放送波等外部の電波源を用い、直達波と反射波の時間差を用いて反射体までの距離を測定する。送信機が必要ないため安価かつ無線局免許が不要であるなど注目されている。近年では汎用デジタル受信キットとオープンソースソフトウェアを用いて有効な受信システムが実現可能であることが示されており[参考文献 4]、パッシブレーダー装置の開発は容易となっている。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、デジタル受信機を用いた短波伝播距離測定装置を開発し、短波到来方向探査装置とあわせて海外放送局電波の到来方向と伝播距離を測定することにより、衛星航法の高度利用を阻害するプラズマバブルの発生・移動を広範囲で効率的に高い精

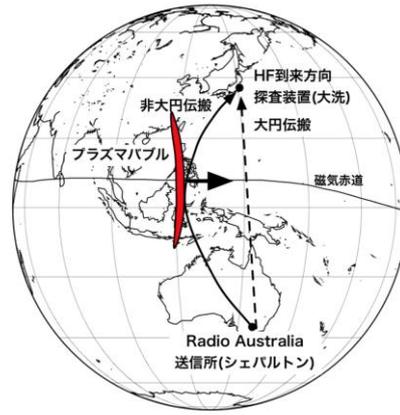


図 2. 短波赤道横断伝搬によるプラズマバブル位置推定。オーストラリアから送信された短波放送波がプラズマバブルにより反射され、大円伝搬方向から離れた方向から到来する。

度で監視するシステムが実現可能であることを実証することである(図2)。

さらに、本研究によりプラズマバブルの移動速度が精度よく決定可能となった場合、GPS シンチレーション、レーダー等との同時観測を行うことにより、大規模・小規模不規則構造のドリフト速度の違いなど、プラズマバブルに伴うプラズマ不安定の物理過程の理解が進むと期待される。

## 3. 研究の方法

汎用のデジタル受信キット(Universal Software Radio Peripheral; USRP)とPCを用いた短波デジタル受信システムの1台を電波源の直近に、もう1台を遠方の任意の場所に設置し、受信する信号の時間差から伝播距離を推定する装置を開発する。(図3)。

赤道横断伝播する短波電波として、本研究では豪州から放送される Radio Australia 放送波を用いる。受信システムを Radio Australia 送信所が設置されている豪州・ビクトリア州 Shepparton 及び情報通信研究機構・大洗方向探査施設に設置し、伝播距離を測定する。同時に大洗方向探査施設で Radio Australia 放送波の到来方向を測定する。

## 4. 研究成果

上記の目的を達成するために、デジタル

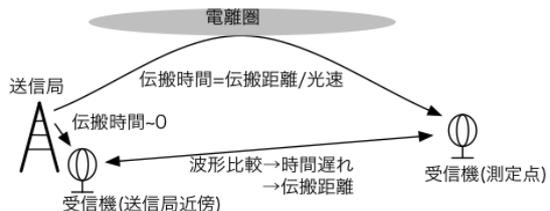


図 3. 伝播距離測定方法

受信機を用いた短波伝播距離測定装置を開発した。短波伝播距離測定装置は2台の短波デジタル受信装置であり、それぞれ短波デジタル受信装置は短波帯アンテナ、デジタル受信キット(USRP)、PC、及び時刻同期用のGPS受信機により構成される。USRPは2つの受信チャンネルをもち、それぞれ短波帯アンテナからの短波放送信号とGPS受信機からの1秒パルス(1PPS)信号を受信し記録する(図4)。同時にGPS受信機の時刻情報を用いてPCの内部時計の誤差を1秒以内に保つことにより、2受信機で受信される短波放送波信号間の時刻同期を誤差 $1\mu\text{s}$ (使用したGPS受信機(GARMIN GPS 18x LVC)の1PPS時刻精度、距離300m相当)で達成することが可能となった。本研究はプラズマバブルの広域監視を目的としており、この時刻同期精度は極めて十分である。図5は実際に開発し使用した短波デジタル受信装置の外観である。

短波伝播距離測定が十分な精度で行えることを確認するために、国内放送局の電波による試験観測を2010年3月17~29日に行った。図6は、2010年3月21日10:00 UTに、ラジオ NIKKEI (千葉県長柄町)の放送波(3.945 MHz)を調布(電子航法研究所)及び宇治(京都大学生存圏研究所)の2地点(水平距離330 km)で短波デジタル受信システムを用いてサンプリングレート32 kHzで記録し、その時間遅れを導出したものである。2地点で観測された波形は距離差140 kmに対応する時間差で高い相関を持ち、測定値のばらつきは5 km程度であることが分かった。この得られた伝播距離差は、2地点間の水平距離(330 km)に対して短い。このとき、情報通信研究機構が国分寺において観測した3.945 MHzの電波の垂直反射高度は224 kmであった。これを用い、放送された短波が電離

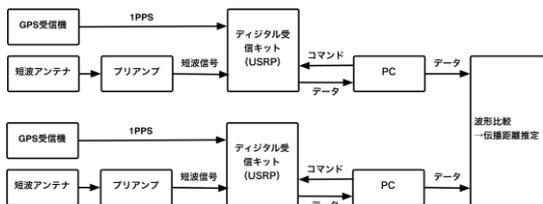


図4. 伝播距離測定装置の構成。



図5. 短波デジタル受信システム

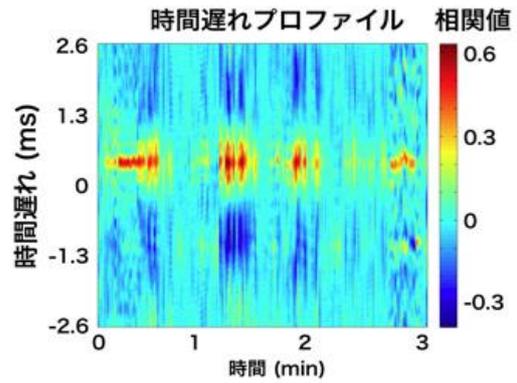


図6. 調布~宇治間の伝播時間差。電離圏観測結果から導かれる伝播距離差140 kmに対応する時間差が検出されている。

圏経由で2地点に到達したと仮定して伝播距離差を推定すると、137 kmとなり(図7)、本研究で開発した伝播距離測定装置により測定された距離差(140 km)はこれとよく一致していることが分かった。これらのことから、本手法が短波赤道横断伝播距離測定に十分な性能を持つことが確認できた。

試験観測で得られた結果に基づいて受信システムの改良を行った上で、2010年10月13日~17日に第1回のRadio Australia放送波を用いた短波赤道横断伝播観測実験を行った。Radio Australiaの放送する放送波のうち、日本-Australiaの夜間に継続して放送され、日本での受信状況が良好な9.475 MHzの放送波を受信することとした。第1回実験では、大洗方向探査施設により多くの非大圏伝播が確認されたが、受信ソフトウェアに不具合が発生したため伝播距離の測定は残念ながら失敗となった。平成22年3月に予定されていた第2回観測実験は、東日本大震災により大洗方向探査施設が被災したため平成23年度に延期した。

第1回のRadio Australia放送波を用いた短波赤道横断伝播観測実験結果に基づき、受信システムの改良を行い、受信システムの安定性を向上させた。改良したシステムを用い

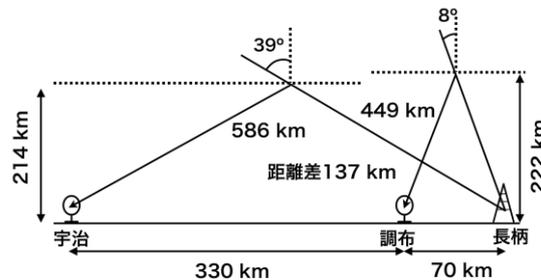


図7. 電離圏観測結果(垂直反射高度224 km)から導かれる長柄-調布および長柄-宇治間の伝播距離差。電離圏入射角により、それぞれの反射高度が222 kmおよび214 kmと補正されている。

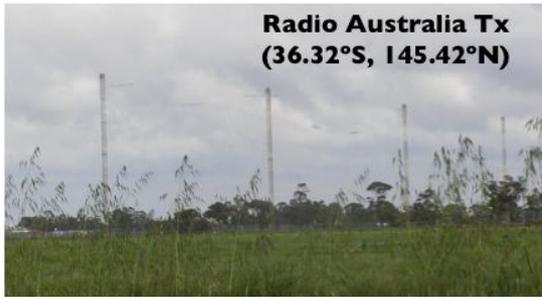


図 8. Radio Australia Shepparton 送信所

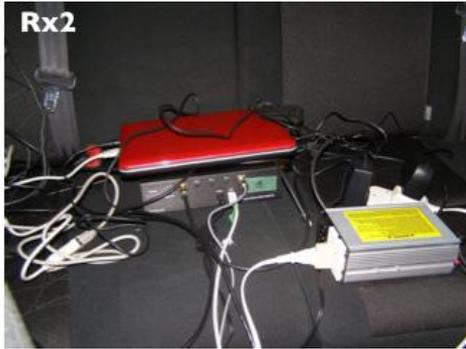


図 9. Shepparton において使用した短波受信システム(車載)



図 10. 大洗方向探査施設の方向探査装置(左)及びアンテナの一部(右)

て 2011 年 4 月 14~17 日及び 2011 年 10 月 20~23 日に、第 2 回及び第 3 回短波赤道横断電波観測を行った。なお、東日本大震災による大洗方向探査施設の被害は幸い大きくなく、プラズマバブル発生季の 4 月中に観測を行うことができた。図 8~10 は、それぞれ Radio Australia Shepparton 送信所、Shepparton で使用した短波受信システム、及び大洗方向探査装置である。

観測を行った 8 晩のうち、2011 年 10 月 21 日を除く 7 晩において、大洗方向探査施設により Radio Australia 放送波の非大圏伝播が観測された。

図 11 は、2011 年 4 月 17 日に大洗方向探査施設により観測された Radio Australia 放送波 (9.475 MHz) の到来方向である。夜間 (10~17 UT 頃) に、大圏伝播方向 (図中の点線) から大きく西方向に外れた方向からの電波到来が多く見られることが分かる。

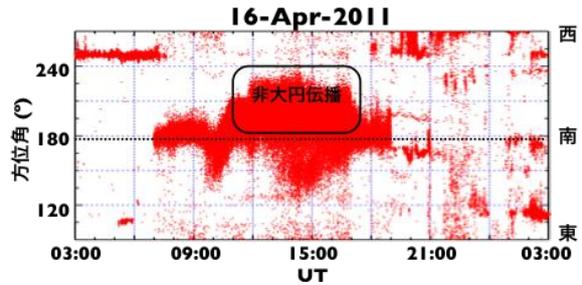


図 11. 2011 年 4 月 16 日に大洗方向探査装置が検出した Radio Australia 放送波 (9.475 MHz) の到来方向。放送時間帯 (08~19 UT) 外に観測されるもの (03~08 UT の方位角 250° 付近など) は、Radio Australia 以外の外来波。

この時、同時に測定した Radio Australia 放送波の伝播距離測定結果を図 12 に示す。また、到来方向の変動の拡大図も同時に示す。非大圏伝播が見られなかった 09~10 UT 頃には伝播距離は約 8500~8700 km の間のいくつかの特定の距離 (大地-電離圏間のホップ数に対応) で安定していた。10 UT 過ぎの非大圏伝播の発生に伴い、伝播距離は最大約 9500 km まで増加し、プラズマバブルの東進に伴い到来方向が南西から南へ変化してはがって徐々に減少するというイベントが複数捉えられた。

これらの結果から、本研究では、デジタル受信機を用いたパッシブレーダーの開発に成功し、短波赤道横断伝播の到来方向測定に伝播距離測定を加えることに成功した。これにより、今後のプラズマバブルの位置推定精度向上の可能性を示唆する結果が得られたと言える。本研究の成果は、定常監視システムとしての短波赤道横断伝播を用いたプラズマバブル監視システムへと活用が期待できる。また、プラズマバブル発生に関わる物理過程の解明やプラズマバブルの発生予測に関する研究への活用も期待できる。

本手法の活用のためには、プラズマバブルの位置推定アルゴリズムの開発が必要であり、伝播シミュレーションを活用した手法が

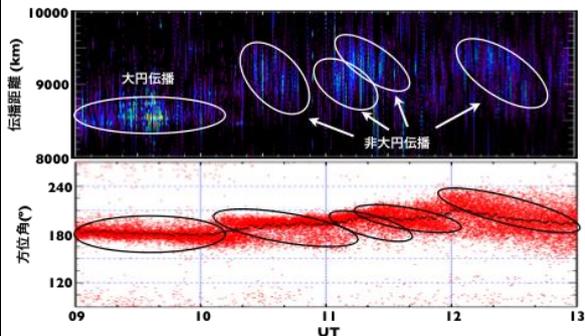


図 12. 2011 年 4 月 16 日の Shepparton-大洗間の Radio Australia 放送波の伝播距離 (上) 及び到来方向 (下)。

有望と考えられる。また、定常監視システムとするための、リアルタイム警報アルゴリズムの開発も必要である。今後も引き続き衛星航法高度利用のための電離圏監視手法の一つとして検討を行っていく予定である。

[参考文献]

- (1) J. Röttger, Wave-like structures of large-scale equatorial spread-F irregularities, *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 35, 1973, pp. 1195-1206.
- (2) S. Saito, T. Maruyama, M. Ishii, M. Kubota, G. Ma, Y. Chen, J. Li, C. Ha Duyen, and T. Le Truong, Observations of small-to large-scale ionospheric irregularities associated with plasma bubbles with a transequatorial HF propagation experiment and spaced GPS receivers, *J. Geophys. Res.*, 2008, doi:10.1029/2008JA013149.
- (3) M. G. Meyer, and J. D. Sahr, Passive coherent scatter radar interferometer implementation, observations, and analysis, *Radio Sci.*, Vol. 39, 2004, RS3008, doi:10.1029/2003RS002985.
- (4) Yamamoto, M., Digital beacon receiver for ionospheric TEC measurement developed with GNU Radio, *Earth Planets Space*, Vol. 60, 2008, pp. e21-e24.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 11 件)

- ①. 齋藤享、丸山隆、石井守、久保田実、短波赤道横断伝搬と GPS シンチレーションによるプラズマバブル観測、情報通信研究機構季報、査読有、Vol. 55, No. 1. 2. 3. 4、2010、pp. 291-304
- ②. 津川卓也、丸山隆、川村眞文、石井守、齋藤享、短波赤道横断伝播によるプラズマバブルの遠隔観測、報通信研究機構季報、査読有、Vol. 55, No. 1. 2. 3. 4、2010、pp. 279-289
- ③. 齋藤享、坂井丈泰、藤井直樹、GNSS 高度利用の為の低緯度電離圏異常監視、航空無線、Vol. 65、2010、pp. 27-32
- ④. 齋藤享、藤井直樹、SBAS 信号を用いる GBAS の開発について、査読有、電子情報通信学会論文誌 B、Vol. 93、2010、pp. 947-954
- ⑤. S. V. Thampi, M. Yamamoto, H. Liu, S. Saito, Y. Otsuka, and A. K. Patra, Nighttime-like Quasi Periodic echoes induced by a partial solar eclipse、査読有、*Geophys. Res. Lett.*、Vol. 37、2010、L09107、doi:10.1029/2010GL042855

- ⑥. S. Banville, R. Langrey, S. Saito, and T. Yoshihara, Handling cycle slips in GPS data during ionospheric plasma bubble events、査読有、*Radio Sci.*、Vol. 45、2010、RS6007、doi:10.1029/2010RS004415
- ⑦. S. Saito, T. Maruyama, M. Ishii, and M. Kubota, Observations of plasma bubbles by HF-TEP and GPS scintillation, *NICT Journal*、査読有、Vol. 56, No. 1. 2. 3. 4、2011、pp. 321-335
- ⑧. T. Tsugawa, T. Maruyama, M. Kawamura, M. Ishii, and S. Saito, Remote sensing observations of equatorial plasma bubble by HF transequatorial propagation、査読有、Vol. 56, No. 1. 2. 3. 4、2011、pp. 309-320
- ⑨. S. Fujita, T. Yoshihara, and S. Saito, Determination of ionospheric gradient in short baselines by using single frequency measurements、査読有、*J. Aero. Astro. Avi.*、Vol. A-42、2010、pp. 269-275
- ⑩. J. Uemoto, T. Maruyama, T. Ono, S. Saito, M. Iizima, and A. Kumamoto, Observations and model calculations of the F3 layer in the Southeast Asian equatorial ionosphere、査読有、*J. Geophys. Res.*、Vol. 116、2011、A03311、doi:10.1029/2010JA016086
- ⑪. A. Saito, T. Tsugawa, Y. Otsuka, M. Nishioka, T. Iyemori, M. Matsumura, S. Saito, C. H. Chen, Y. Goi, and N. Choosakul、Acoustic resonance and plasma depletion detected by GPS total electron content observation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake、査読有、*Earth Planets Space*、Vol. 63、2011、pp. 863-867

[学会発表] (計 13 件)

- ①. 齋藤享、デジタル受信機を用いたプラズマバブルの広域監視、中間圏・熱圏・電離圏研究会、京都市・京都教育文化会館、2009年11月30日
- ②. 齋藤享、坂井丈泰、松永圭左、吉原貴之、航空航法における衛星航法の利用と電離圏の影響、宇宙天気ユーザーズフォーラム、小金井市・情報通信研究機構、2009年12月21日
- ③. 齋藤享、デジタル受信機を用いたプラズマバブル広域監視法の開発、第5回 MU レーダーシンポジウム、宇治市・京都大学宇治キャンパス、2010年1月20日
- ④. 齋藤享、USRP を用いた「送信なしのレーダー」の実験、GnuRadio ワークショップ、東京・東大駒場、2010年7月14日
- ⑤. S. Saito and N. Fujii、Effects of

external ionosphere anomaly monitors on GNSS augmentation systems studied with a three-dimensional ionospheric delay model - a study for GBAS、ION GNSS 2010、米国・ポートランド、2010年9月21～24日

- ⑥. 齋藤享、丸山隆、山本衛、デジタル受信機と方向探査装置を用いた短波赤道横断伝播によるプラズマバブルの観測、地球電磁気・地球惑星圏学会第128回講演会、那覇市・沖縄県市町村会館、2010年11月2日
- ⑦. S. Saito、Ionospheric effects on Global Navigation Satellite Systems and the application to aviation (招待講演)、SEALION International Symposium、タイ・バンコク、2011年1月27日
- ⑧. S. Saito、and T. Maruyama、Study of day-to-day variability of plasma bubble occurrences by using SEALION ionosonde data、SEALION International Symposium、タイ・バンコク、2011年1月27日
- ⑨. 齋藤享、松永圭左、吉原貴之、星野尾一明、坂井丈泰、大塚雄一、プラズマバブルに伴う電離圏不規則構造の衛星航法に対する影響とその発生の日々変動に関する研究、日本地球惑星科学連合2011年大会、千葉市・幕張メッセ国際会議場、2011年5月26日
- ⑩. 齋藤享、山本衛、H. Liu、S. V. Thampi、丸山隆、日食に伴うQPエコーのイメージング観測による日中Es層の空間構造の研究、日本地球惑星科学連合2011年大会、千葉市・幕張メッセ国際会議場、2011年5月26日
- ⑪. S. Saito、T. Maruyama、and M. Yamamoto、Plasma bubble monitoring by HF trans-equatorial arrival angle and propagation distance measurements、URSI GASS 2011、トルコ・イスタンブール、2011年8月
- ⑫. 齋藤享、衛星航法のための電離圏異常監視、インドネシア宇宙天気研究会、小金井市・情報通信研究機構、2011年11月
- ⑬. 齋藤享、電離圏観測手法の衛星航法利用援助への応用、第26回大気圏シンポジウム、相模原市・JAXA宇宙科学研究所、2012年3月

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況 (計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

齋藤 享 (SAITO SUSUMU)

独立行政法人電子航法研究所・航法システム領域・主任研究員

研究者番号: 40392716

研究者番号:

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号:

### (4) 研究協力者

丸山 隆 (MARUYAMA TAKASHI)

独立行政法人情報通信研究機構・嘱託

研究者番号: 80359017

山本 衛 (YAMAMOTO MAMORU)

京都大学・生存圏研究所・教授

研究者番号: 20210560

津川 卓也 (TSUGAWA TAKUYA)

独立行政法人情報通信研究機構・電磁波計測研究所・主任研究員

研究者番号: 20377782

大塚 雄一 (OTSUKA YUICHI)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授

研究者番号: 40314025