

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 5 月 16 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2011

課題番号：20360183

研究課題名（和文） フォーメーションフライト衛星による高度連携電磁波計測法の研究

研究課題名（英文） Study on co-operational measurement system for plasma waves by means of formation-flying satellites

研究代表者

笠原 禎也（KASAHARA YOSHIYA）

金沢大学・総合メディア基盤センター・教授

研究者番号：50243051

研究成果の概要（和文）：地球近傍の宇宙環境を詳細計測する目的で、編隊飛行（フォーメーションフライト）する複数の小型衛星群に電磁波観測器を搭載し、衛星群が相互に連携して観測動作を行う技術について基礎研究を行った。衛星間通信を用いて衛星搭載器同士が情報交換して最適な観測動作を自律的に決定する課程を模擬実験する装置を開発して種々の連携方式を評価したほか、衛星に搭載可能な計算機資源で重要データを選別・圧縮する手法や、得られたプラズマ波動観測データから宇宙空間の電子密度分布を推定する手法を提案した。

研究成果の概要（英文）：In order to achieve an observation of the space plasma environment around the Earth using formation-flying satellites, we performed feasibility studies on the intelligent software receiver onboard these satellites. We developed a system using LAN-connected PCs in order to simulate inter-communication among satellites as well as onboard data processing functions, and evaluated several kinds of co-operational observation algorithms under realistic condition. Second, we studied advanced data processing methods such as spectrum analyses, data compression and selection to be implemented on the onboard software within a limited computer resource. We also proposed techniques for deriving electron density profile from the data measured by the plasma wave instruments.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2009年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2010年度	2,900,000	870,000	2,770,000
2011年度	2,200,000	660,000	2,860,000
年度			
総計	13,800,000	4,140,000	17,940,000

研究分野：電波計測工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：電波科学，宇宙科学，自律制御ソフトウェア，衛星通信，科学衛星，磁気圏

1. 研究開始当初の背景

(1) 編隊飛行衛星観測計画の国際動向

太陽系の惑星間空間および惑星周辺は希

薄な電離気体（宇宙プラズマ）で満たされ、その環境は太陽活動などに依存してダイナミックに変動する。特に地球周辺プラズマは、

電離層擾乱による無線通信障害や GPS の測位誤差、太陽フレアや磁気嵐を引金にした人工衛星の故障・誤作動など、人類の生活に大きく影響を及ぼすことが知られる。地球周辺プラズマ物理の研究アプローチはいくつかあるが、科学衛星は観測器を現場に送り込み、「その場(in situ)」を直接計測する唯一の手段である。しかし衛星による in situ 観測は、移動する飛翔体での 1 点観測ゆえに空間構造の時間・空間変化が切分けできず、構造全体の巨視的変動の把握が困難である。さらに宇宙プラズマ中では、多数の要因が融合して異なる時間・空間スケールの現象が同時発生的に起こり、因果関係の解明が極めて難しい。

このため、国際的にも「複数衛星を用いた同時観測」の重要性が強調されており、海外ではすでに欧州の衛星 CLUSTER(4 機編隊)や、米国の THEMIS(5 機編隊)が運用中で、我が国では「SCOPE」プロジェクト、さらには SCOPE を欧州のプロジェクトと連携させる「XScale (クロススケール)」と呼ばれる複数衛星による編隊飛行(フォーメーションフライト)計画が検討されていた。

(2) 電磁波による宇宙電磁環境モニタの意義

遠来から伝搬する電磁波を元に、遠方の情報を推定する手段として、科学衛星による電磁波計測は重要な役割を果たす。我々は、VLF 帯電磁波が電波源から観測点に至る伝搬路上で屈折・反射・遅延することを利用し、宇宙プラズマの媒質特性や空間構造を推定する手法で、数々の成果を上げていた。

一方、プラズマ波動の物理特性の研究では、従来は波動のスペクトルの特徴が利用されていたが、GEOTAIL 衛星に搭載された生波形デジタル計測器で、これまで生成機構が不明だった広帯域静電ノイズが、インパルス状の孤立波形(静電孤立波)であることを発見し、波形観測の重要性・有効性が認知されて以来、世界の科学衛星が競って波形計測器を搭載する潮流が形成された。しかし時間・周波数平均できるスペクトルデータに比べ、生波形データは、衛星のテレメトリ伝送容量の制約から、ごく一部しか地上伝送できないという問題がある。すなわち、限られたデータから最大限の科学的成果を得るには、電力・重量・熱などの制約条件が厳しい衛星上で、コンパクトかつ簡易な手法で重要データを機上で選別・圧縮する高機能ソフトウェア受信器の開発が波形計測器の性能を左右する重要なファクターとされている。特に複数衛星の同時打ち上げ・観測を行なうには、従来型の観測器をさらに超軽量化・超小型化することが必須で、相応の技術上のブレークスルーが絶対不可欠であった。

2. 研究の目的

本研究課題では、本研究課題では、人類の活動に影響を及ぼす地球近傍宇宙環境を高機能計測するシステムとして、編隊飛行(フォーメーションフライト)する小型衛星群に搭載する VLF 帯電磁波動高度連携同時多点観測器に関する基礎研究を行なう。そのために本研究では、以下に示す 3 つの研究目標を定める。

(1) 衛星間通信を活用した高度連携観測法の研究

本研究では、単に編隊飛行衛星を複数配置して同時多点観測するのではなく、複数衛星が、相互に情報交換し連携して同時観測を行なう方法を検討する。これにより、衛星同士が相互に通信し、連携して随時最適な観測モードを機上で自律的に判断することで、有意なデータのみを地上伝送し、限られたデータで最大限の科学成果を得る方法を検討する。

(2) 電磁環境計測データの自動選別・圧縮技術の研究

データ圧縮や重要データの選別技術は、音声・画像など様々な分野で研究が進められているが、宇宙探査は、特性が既知の事象だけでなく、「未知」で「発見的」な特異事象が数多く含まれる自然現象を取り扱うことが特徴である。そのため、計測データの本質を失う圧縮法は採用できない。また「発見的」データほど優先的に取得・伝送する機能が重要となる。そこで、複数衛星で得た多点観測データを、機上で評価し、重要データのみを地上に圧縮伝送する技術を研究する。

(3) 電磁波多点観測データを用いたグローバルセンシング法の研究

電磁波を多点同時観測することで、高時間・空間分解能な宇宙プラズマ構造の解明が期待できる。そこで各衛星による電磁波多点観測データから、3 次元的な空間構造を再構築するためのアルゴリズムについて検討する。

これら 3 つの検討結果を総合的に組み合わせることで、来るべきフォーメーションフライト衛星の設計に必要な知見を得る。

3. 研究の方法

前項で述べた 3 つについて、以下の手順で研究を実施した。

(1) 高度連携観測シミュレータの開発

従来、欧米で実施あるいは計画されてきた複数衛星ミッションは、複数衛星群を宇宙空間に配置するものの、個々の衛星は独立動作をするものであった。それに対し、我が国で計画中の SCOPE ミッションは、親衛星を中

心に、それより小型の子衛星を近距離に1機（近子機）、遠距離に2~3機（遠子機）配置し、親子間で衛星間通信を用いて精密な測距・同期観測を行う方法が検討されている（図1）。

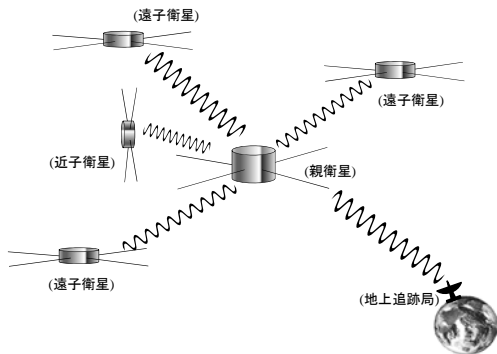


図1：編隊飛行衛星群のイメージ図

本研究では、この衛星間通信を測距・同期の目的だけに限らず、親子編隊衛星群が相互に観測状態をリアルタイムで情報交換することで、衛星群が連携して最適な観測パラメータ（周波数・時間分解能や観測頻度、受信機のゲインなど）を自律的に設定し、同時観測を行なうことで、より多くのサイエンスアウトプットを獲得するための連携観測技術を検討・提案する。

そのために、実運用に近い状態で模擬実験できる実験装置（シミュレータ）を開発し、衛星搭載の各測器の制御アルゴリズムや、自律的に動作するソフトウェア技術を、実験的に研究・開発する環境を整える。

シミュレータは、有線LANで相互接続した複数台のデスクトップPCをそれぞれ個別の衛星と見立て、衛星間通信による親子衛星間コマンド・テレメトリ伝送を、有線LANによるプロセス間通信で模擬する通信モジュールを開発した。さらに、宇宙空間の通信環境を模擬するため、宇宙空間模擬専用デス

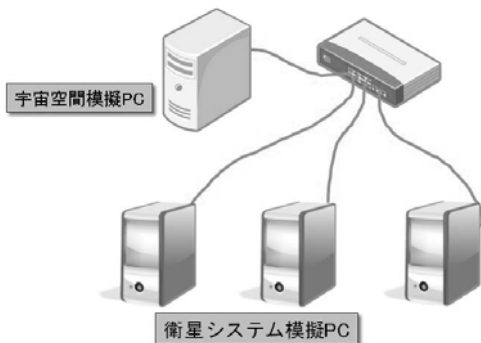


図2：高度連携観測シミュレータ構成図

クトップPCを別途準備し、衛星間通信のデータレートや遅延時間などを任意に制御で

きる宇宙空間模擬モジュールを開発して同PC上に実装した。これにより、衛星間通信の遅延時間や、子衛星から親衛星への観測状態の通知と、情報集約した親衛星での最適動作の決定と子衛星に対する次の観測動作の指示を伝達する一連の動作をシミュレータ上で実験できる環境を整備した（図2）。

(2) 電磁環境計測データの自動選別アルゴリズムの検証・評価

前述のとおり、プラズマ波動の生成・伝搬過程を詳細に解析するには、波形観測や高分解能スペクトルデータの取得が必須である。このような観測要求を、電力・重量・熱などの制約条件が厳しい衛星上で満たすには、機上にソフトウェアを搭載し、電磁界センサで取得した信号から、重要なデータを機上で選別・圧縮する技術が必要である。特に、取得データのうち数%程度しか地上伝送できない条件下で、未知で発見的な特異事象を含む自然波動を、その本質を失わないように伝送データ量を削減するには、データ圧縮技術だけではカバーできず、重要なデータのみを抽出し、雑音しか含まない不要データは積極的に機上で棄却するアルゴリズムを開発する必要がある。

本研究では、2007年秋に打ち上げられた月探査衛星かぐやに、我々が開発・搭載した波形捕捉器（LRS/WFC）に実装済であった自然電波の自動判別機能を月周回軌道上で実際に運用し、選別機能の有効性や実際に使用したデータ判別用パラメータの妥当性を評価する。さらに、機上のCPU性能やメモリ蓄積量などのリソースに制約を与えた場合の影響についても定量的に示す。

かぐや開発当時はまだ実現していなかったリアルタイムOSが、今後の将来衛星には搭載されることから、リアルタイムOS上で走る優先度の異なる複数アプリケーション上での、最適な各種ジョブの分割と統合管理など、新しい機上処理ソフトウェアの設計法を確立するとともに、波動の偏波情報や楕円率など、波形圧縮以外の方法でプラズマ波動の特徴的なパラメータを機上で使用可能なリソース内で算出し、少ないテレメトリ伝送量で送信可能な信号処理アルゴリズムを研究する。

(3) 自然波動データを用いたグローバルセンシング法の研究

あけぼの衛星で観測された雷起源電波（ホイストラ）の自動検出アルゴリズムを改良し、地球プラズマ圏内で観測されるホイストラの特徴パラメータをデータベース化する。さらに、データベース化した雷起源電波（ホイストラ）の特性パラメータやGPS電波による全電子数などの観測結果と地球周辺プラズマ

の電子密度モデルの比較、かぐや衛星による衛星軌道上や月表層部の電子密度の空間構造の推定など、プラズマ中の電磁波の特性からの電子密度分布推定する手法を研究・開発し、SCOPE 計画での多点観測データからのプラズマの空間構造推定に必要な基礎技術を確立する。

(4) 高度連携観測シミュレータを用いた連計画足実験と提案アルゴリズムの有効性の評価

(1)の項目で実施した高度連携観測シミュレータに、考案した最適観測モード決定アルゴリズムを取り込み、各衛星に疑似データを与えることで、実際の連携観測動作を模擬実験する。得られた結果を評価し、提案するアルゴリズムが、各衛星が独立に観測動作を行う場合に比べ、どの程度の改善が期待できるか、また高度連携観測動作を導入することによる長所・短所を明らかにする。

4. 研究成果

高度連携観測シミュレータは、親子衛星間の通信モジュール、通信に要する遅延時間などを模擬する宇宙環境模擬モジュール、各衛星に搭載する観測器の機上処理モジュールなど、連携実験を行うための必要機能を、モジュール別に開発し、それらを階層的に整備することで3~5機で構成される編隊飛行衛星の動作を模擬実験できる環境を整えた(図3)。

このシミュレータに、月探査衛星かぐやで取得した自然波動観測データをもとに生成した疑似観測イベントを与え、親子衛星間のイベント情報交換手順と、親衛星の判断に基づく最適観測動作の実験を行った。その結果、親衛星の周辺で観測を行う子衛星の観測状態を親衛星に集約し、親衛星が最適観測パラメータを子衛星に指示を与える連携動作を行うことで、観測的に重要な領域を最適パラメータで観測する割合が、個々の衛星を独立運用する場合に比べ、向上することが実証で

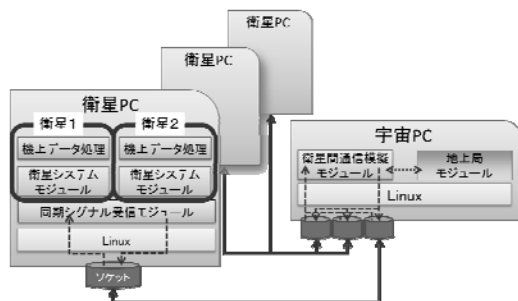


図3: 高度連携観測シミュレータの内部構成

きた。

さらに、SCOPE 計画が観測対象とする地

球磁気圏について、静的な磁気圏モデルを仮定し、空間スケールやその形状が異なる種々の領域を衛星群が通過する条件下で最適解を得るための多数決論理・少数派優先モードの決定法を提案した。今後、磁気圏が同的に変化する場合や、個々の衛星の軌道条件の季節変化、一部の衛星が観測状態を誤判定した場合など、様々な実験環境を高度連携観測シミュレータ上で再現し、連携観測動作をとることで、逆に観測効率が低下したり、一部の観測器の誤判断や衛星間通信の断絶などで、編隊飛行衛星群全体の誤作動につながらない安全な制御アルゴリズムを確立していく必要がある。

プラズマ波動観測器が計測した電磁波形式データの機上ソフトウェア処理に関して、以下の検討を行った。まず、かぐや衛星搭載の波形捕捉器(LRS/WFC)に実装した自動判別機能の妥当性を定量評価し、かぐやの運用で用いた判別パラメータが妥当性を実証した。さらに、時間局所的な観測イベントを正確に検出するための改善点や、観測波動の偏波や楕円率などの特徴パラメータを機上の限られたリソースで算出する信号処理手法を示した。さらに、機上のCPU性能やメモリ蓄積量などのリソースに制約を与えた場合の影響を定量的に示した。次に、波動のスペクトル処理で大きな計算負荷を占める高速離散フーリエ変換に、三角関数のテーブル化や2成分同時処理法を導入することで、数値誤差を抑圧して軽負荷化し、波動の偏波などの特性パラメータを、機上で利用可能なCPU性能とメモリ容量内で実現可能なことを示した。これらの成果は、今後、SCOPE衛星搭載用プラズマ波動観測器の詳細仕様を検討する上で、重要な基礎技術である。

自然波動の伝搬特性を用いた宇宙プラズマの空間構造推定法に関しては、あけぼの衛星で観測された雷起源電波(ホイストラ)の自動検出アルゴリズムを改良し、地球プラズマ圏内で観測されるホイストラの特徴パラメータがデータベース化した。さらに、データベース化した雷起源電波(ホイストラ)の特性パラメータやGPS電波による全電子数などの観測結果と地球周辺プラズマの電子密度モデルの比較を行い、実測に基づくプラズマ圏内の電子密度空間構造モデルの補正法を提案した。さらに、かぐや衛星による衛星軌道上や月表層部の電子密度の空間構造の推定など、プラズマ中の電磁波の特性から電子密度分布が推定できることを観測的に示した。これらの成果は、SCOPEにおいて複数衛星が同時多点観測を行ったデータを源泉に、観測域の詳細な空間構造とその時間変化を推定するための基盤技術となる。

以上の成果は、次項に示す国内外の学会発表や学術論文として成果公表されたほか、現

在、宇宙航空研究開発機構（JAXA）に行われている SCOPE 計画の feasibility study においてもその科学的意義が認められ、親子衛星間で観測情報を交換可能にする衛星間通信機能が、同計画推進の技術検討課題の一つに加えられた。

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 12 件）

- ① Y. Goto, Y. Kasahara, T. Ide, Improvement of Equatorial Density Distribution of the Global Core Plasma Model using GPS-derived TEC, *Radio Science*, 査読有, 47(RS0F12), doi:10.1029/2011RS004763, 2012.
- ② 大池 悠太, 笠原 禎也, 後藤 由貴, かぐや衛星搭載自然波動観測装置 (LRS/WFC)におけるデータ選別アルゴリズムの性能評価, *電子情報通信学会論文誌*, 査読有, J94-B(8), 978-987, 2011.
- ③ 竹中 悟, 笠原 禎也, 小嶋 浩嗣, 井町 智彦, 編隊飛行衛星による連携観測模擬実験システムの開発, 査読有, *電子情報通信学会論文誌*, J94-B(7), 880-889, 2011.
- ④ Y. Goto, T. Fujimoto, Y. Kasahara, A. Kumamoto, T. Ono, Lunar Ionosphere Exploration Method Using Auroral Kilometric Radiation, *Earth, Planets and Space*, 査読有, 63(1), 47-56, doi:10.5047/eps.2011.01.005, 2011.
- ⑤ K. Hashimoto, M. Hashitani, Y. Kasahara, (他 10 名), Electrostatic Solitary Waves Associated with Magnetic Anomalies and Wake Boundary of the Moon Observed by KAGUYA, *Geophys. Res. Lett.*, 査読有, 37(L19204), doi:10.1029/2010GL044529, 2010.
- ⑥ T. Ono, A. Kumamoto, Y. Kasahara, Y. Yamaguchi (他 10 名), The Lunar Radar Sounder (LRS) Onboard the KAGUYA (SELENE) Space craft, *Space Science Reviews*, 査読有, 154(1-4), 145-192, doi: 10.1007/s11214-010-9673-8, 2010.
- ⑦ Y. Kasahara, A. Hirano, and Y. Takata, Similar Data Retrieval from Enormous Datasets on ELF/VLF Wave Spectrum Observed by Akebono, *Data Science Journal*, 査読有, 8, IGY66-IGY75, doi:10.2481/dsj.SS_IGY-002, 2010.
- ⑧ 寺尾 康宏, 笠原 禎也, 笠羽 康正, 井町 智彦, 後藤 由貴, 小嶋 浩嗣, 水星探査衛星 MMO 搭載プラズマ波動観測器の機上処理ソフトウェアの開発, *信学技法*,

査読無, 109(426), 19-23, 2010.

- ⑨ 竹中 悟, 笠原 禎也, 小嶋 浩嗣, 井町 智彦, 編隊飛行衛星による連携観測模擬実験システムの開発, *信学技法*, 査読無, 109(426), 25-28, 2010.

〔学会発表〕（計 51 件）

- ① Y. Kasahara, K. Kanatani, Y. Goto, (他 7 名), Statistical Studies of Electron Density around Lunar Wake Boundary Derived from WFC Observation onboard KAGUYA, 2011 American Geophysical Union Fall Meeting, 2011.12.8, Moscone Center, San Francisco (U.S.A.).
- ② 福原 始, 小嶋 浩嗣, 笠原 禎也, 後藤 由貴, 山川 宏, 電波伝搬特性を用いた小型衛星コンステレーションによるプラズマ圏微小構造観測, 第 130 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2011.11.5, 神戸大学(兵庫県).
- ③ 大池 悠太, 笠原 禎也, 後藤 由貴, かぐや搭載自然波動波形捕捉器(WFC)における機上データ選別機能の運用実績評価と将来衛星に向けた選別手法高度化の検討, 第 130 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2011.11.4, 神戸大学(兵庫県).
- ④ 松田 昇也, 笠原 禎也, 後藤 由貴, あけぼの衛星 VLF 波動観測装置による磁界観測データからのイオン組成比の推定, 第 130 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2011.11.4, 神戸大学(兵庫県).
- ⑤ Y. Goto, Y. Kasahara, T. Fujimoto, A. Kumamoto, T. Ono, Vertical Plasma Extent above the Lunar Surface Derived from Interference Pattern of Auroral Kilometric Radiation, 30th General Assembly of International Union of Radio Science (URSI), 2011.8.19, Lutfi Kirdar Convention & Exhibition Center (Turkey).
- ⑥ Y. Kasahara, S. Kitaguchi, Y. Goto, K. Hashimoto, Y. Omura, H. Kojima, (他 4 名), Plasma Waves Related to Mini-Magnetospheres over Lunar Magnetic Anomalies Observed by LRS/WFC Onboard KAGUYA, 30th General Assembly of International Union of Radio Science (URSI), 2011.8.19, Lutfi Kirdar Convention & Exhibition Center (Turkey).
- ⑦ T. Imachi, Y. Kasahara, Y. Goto, Y. Kasaba, H. Kojima, Software Development of EWO-WFC/OFA aboard Bepi-Colombo MMO Spacecraft, 30th General Assembly of International Union of Radio Science (URSI), 2011.8.16, Lutfi Kirdar Convention & Exhibition Center (Turkey).
- ⑧ 松田 昇也, 笠原 禎也, 後藤 由貴, プラズマ波動の偏波情報解析のためのリア

ルタイム机上ソフトウェア処理法の研究, 地球惑星科学連合学会 2011 年合同大会, 2011.5.26, 幕張メッセ(千葉県).

- ⑨ 竹中 悟, 笠原 禎也, 小嶋 浩嗣, 磁気圏モデルを考慮した編隊飛行衛星の連携観測法の検討, 地球惑星科学連合学会 2011 年合同大会, 2011.5.26, 幕張メッセ(千葉県).
- ⑩ 後藤 由貴, 笠原 禎也, **GCPM と GPS-TEC を利用したプラズマ圏電子密度分布モデルの構築**, 地球惑星科学連合学会 2011 年合同大会, 2011.5.23, 幕張メッセ(千葉県).
- ⑪ 笠原 禎也, 衛星による ELF/VLF 帯観測とその将来展望(招待講演), GEMSIS-太陽, 磁気圏, 電離圏ワークショップ 2010, 2010.12.27, 名鉄犬山ホテル(愛知県)
- ⑫ S. Takenaka, Y. Kasahara, H. Kojima, T. Imachi, Development of a co-operational observation simulator for formation-flying magnetospheric exploration mission, 2010 Asia Pacific Radio Science Conference, 2010.9.24, Toyama International Conference Center (富山県).
- ⑬ Y. Goto, Y. Kasahara, S. Hayashi, T. Ide, Modeling of the Plasmaspheric Density Profile from Large Datasets of VLF Waves and GPS Signals (Invited Paper), 2010 Asia Pacific Radio Science Conference, 2010.9.23, Toyama International Conference Center (富山県).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

笠原 禎也 (KASAHARA YOSHIYA)

金沢大学・総合メディア基盤センター・教授

研究者番号 : 50143051

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

井町 智彦 (IMACHI TOMOHIKO)

金沢大学・総合メディア基盤センター・准教授

研究者番号 : 60372489

(H20→H22 : 研究分担者)

後藤 由貴 (GOTO YOSHITAKA)

金沢大学・電子情報学系・助教

研究者番号 : 30361976

(H20→H22 : 研究分担者)

小嶋 浩嗣 (KOJIMA HIROTSUGU)

京都大学・生存圏研究所・准教授

研究者番号 : 10215234

(H20→H22 : 研究分担者)