

「宇宙線ミュオンを用いた革新的測位・構造物イメージング等応用
技術」に関する研究開発構想（個別研究型）

令和5年3月

内閣府

文部科学省

目次

1 構想の背景、目的、内容.....	2
1.1 構想の目的.....	2
1.1.1 政策的な重要性.....	2
1.1.2 我が国の状況.....	3
1.1.3 世界の取組状況.....	4
1.1.4 構想のねらい.....	4
1.2 構想の目標.....	4
1.2.1 アウトプット目標.....	5
1.2.2 アウトカム目標.....	5
1.3 研究開発の内容.....	5
1.3.1 研究開発の必要性.....	5
1.3.2 研究開発の具体的内容例.....	6
1.3.3 研究開発の達成目標.....	7
2 研究開発の実施方法、実施期間、評価.....	8
2.1 研究開発の実施・体制.....	8
2.2 研究開発の実施期間.....	8
2.3 評価に関する事項.....	9
2.4 社会実装に向けた取組.....	9

1 構想の背景、目的、内容

1.1 構想の目的

1.1.1 政策的な重要性

宇宙線ミュオンは素粒子の一つで、①透過力が強く直線経路を有し、②真空中での光速とほぼ同じ速度で、③地球上のどこにいても昼夜を問わず一定の頻度で降り注ぐという特徴がある。

これまで我が国では、非破壊で内部を観測できるというミュオンの特徴を生かして、直接内部を観測することが困難な火山等の自然現象の観測や、ピラミッドの調査といった考古学等への利用が行われてきた。特に日本列島は火山活動が極めて活発な地域であり、噴火予測等は重要な防災技術の一つであるため、噴火現象の解明に向けて、科学的な観測技術を高度化していく必要があると指摘¹されている。このように、ミュオンを利用した自然現象観測の高度化等は、自然現象のメカニズム解明のみならず、それによる防災対策の観点からも期待が高まっている。

また近年、我が国を中心に、発生制御の必要がない自然現象である宇宙線ミュオンの特徴を最大限活用した、新たな測位・時刻同期技術（PNT²技術）等の応用への可能性が高まっている。現在、PNT 技術には主に GPS 等の全球測位衛星システム（GNSS³）が活用されており、現代社会における必須の基盤システムとして世界的に浸透しているが、太陽フレアによる干渉や妨害電波、衛星の不具合等の潜在的な脆弱性を有するとともに、電波を用いるために透過性が低く、海中や地下、建物内部等では可用性が十分でないことが課題となっている。こうした中、米国では PNT を強靱化する技術の策定が求められており⁴、2022 年 11 月には米・海軍省において宇宙線ミュオンを用いた PNT 技術の開発に対する予算が措置される等、研究

¹ 災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第 2 次）の推進について（建議）（2019 年 1 月 30 日、科学技術・学術審議会）

² Position, Navigation and Timing

³ Global Navigation Satellite System

⁴ Executive Order 13905 "Strengthening National Resilience Through Responsible Use of Positioning, Navigation, and Timing Services"（2020 年 2 月、米・大統領府）

進展の兆候が見られる。

このように、構造物イメージングや、GNSSを用いたPNTを代替する技術、特殊環境下でも可用性の高いPNT技術等、ミュオンを用いた技術応用の体系を整理することは、我が国の基盤システムの強靱化や、我が国における新たな技術の独自・自律的な確保につながる等の意義がある。

本構想は、個別研究型として、こうした背景の下、研究開発ビジョン（第一次）において定められた「宇宙線ミュオンを用いた革新的測位・構造物イメージング等応用技術」において、我が国技術の優位性の獲得を目指すものである。

1.1.2 我が国の状況

我が国は、世界に先駆けてミュオンを用いた火山のイメージング技術の実証に成功し、これまで国内外において火山やピラミッドといった大型構造物の内部構造の可視化や海底トンネルを利用した潮位変化の計測等を行う技術応用が進められている。また、学術研究の側面からGNSS信号が届かない海中や地下でのナビゲーション技術の研究、宇宙空間と大気圏との境界で多重生成する宇宙線ミュオンを用いた時刻同期等の技術提唱がなされている。

一方、宇宙線ミュオンを用いた構造物イメージングは高速撮像等には至っておらず、宇宙線ミュオンの発生頻度に起因する物理的な限界をはじめ、検出器の性能や価格、サイズ等の面からの課題も指摘される。また我が国主導で技術提案が行われている海中や地下でのPNT等の技術応用も、学術研究の観点での研究進展はあるものの、実用段階に至るアプリケーション開発には至っていない。その中で、ミュオンの発生を宇宙線に依らず、人工的に生成した高強度のミュオンビームにより短時間での観測等を実現するアプローチも提唱されているが、実現に向けては装置の小型・可搬化の技術開発等が課題である。

PNT等の宇宙線ミュオンの新たな技術応用については、技術提唱からまだ日が浅く、基礎物理学と工学の境界領域であるために各領域の専門家が積極参入しにくい等の課題があり、研究者・技術者のコミュニティ醸成は十分ではない。

我が国は伝統的に宇宙線ミュオンやミュオンの人工的な生成を含む基礎

科学の領域に強みを有し、研究人材の層にも厚みがある。このため研究の進展により強固なコミュニティ醸成が図られる土壌があり、ミュオンを用いた測位・構造物イメージング等の技術を高度化していくための高いポテンシャルを有しているといえる。

1.1.3 世界の取組状況

学術研究の面では、米国では 2011 年頃から国防総省において、欧州では 2019 年頃から Horizon 2020 において、それぞれ大型プロジェクトが立ち上がり、現時点でミュオンを応用した技術分野における論文の著者の多くが欧米の研究者となっている。

技術応用の観点では、構造物イメージングについて、国内外において大型構造物の内部構造の可視化に係る学術的な報告が増加傾向にあり、カナダにおいては検出装置のダウンサイジングによる鉱床探査の実績が報告される等、欧米を中心に宇宙線ミュオンの活用を進める研究者数が増加傾向にある。また PNT については、米国において、GNSS 信号が利用できない場所における PNT 技術の研究開発が開始されている。

現状、ミュオンを応用した技術については、高速化、撮像視野の広角化、小型化等、検出器の高性能化には一定の進展があるものの、装置価格等の課題から学術研究への活用が中心であり、具体的なアプリケーション開発には至っていない。

1.1.4 構想のねらい

本構想により、ミュオンによる PNT 技術体系の整理・獲得や、ミュオンによる構造物イメージングの高度化を達成することで、我が国のミュオンを応用した技術の優位性獲得や標準化を狙う。構造物イメージングの革新による火山や津波の観測等の省力化・高度化や、GNSS 通信が不可能な環境下での PNT 技術体系の整理・獲得による海底の地形変化、潮位観測等の新たな技術の社会実装により、我が国の総合的な防災力の向上につなげるといった公的利用に加え、鉱山や海底鉱床等の資源探査といった民生利用にも貢献することを目指す。

1.2 構想の目標

1.2.1 アウトプット目標

<測位・時刻同期（PNT）技術>

- 海底の地形変化等を捉えるため、GNSS 通信が不可能な環境下において位置情報の取得が可能な技術体系の整理を見据えた要素技術開発
- 建物内部や地下等の GNSS 通信が不可能な環境下において時刻同期が可能な技術体系の整理を見据えた要素技術開発
- ミュオンを用いた PNT 技術の実装（小型化等）に向けた要素技術の高度化
- 上記の技術応用に係る、シミュレーション等を用いた妥当性検証

<構造物イメージング技術>

- ミュオンを用いた火山活動の深部（基部）、潮位や海水密度等の自然現象の観測やインフラ構造物やコンテナ等の検査精度の向上等、ミュオンを用いた構造物イメージングの実装に必要な要素技術、インテグレーション技術の高度化
- インフラ構造物やコンテナ等のイメージング技術の革新的発展に向けた、人工的にミュオンを生成する可搬システムの開発及び応用に係る検出器等の要素技術及びデータ処理技術の高度化
- 上記の技術応用に係る、シミュレーション等を用いた妥当性検証

1.2.2 アウトカム目標

我が国発の宇宙線ミュオン等による PNT 技術、構造物イメージング等に係る要素技術の確立や技術体系の整理、ミュオンを応用した技術に係る学術を中心とした研究人材と産業界とを糾合・発展させた、産学官の連携を推進するコンソーシアムの醸成等の実現により、我が国の民間企業等への技術移転の可能性把握による民間投資の拡大、火山活動や潮位観測等の高度化による防災・減災技術の高度化といった公共利用の拡大等、幅広い主体への寄与が期待される。

1.3 研究開発の内容

1.3.1 研究開発の必要性

<測位・時刻同期（PNT）技術>

海中や地下、建物内部等 GNSS 信号が受信できない環境や、太陽フレア等の影響等による GNSS 信号の異常時において位置情報を把握するには、地上や海上、屋外に移動して GNSS 信号を取得する又は電波や音波等により位置情報を特定する等の制約が生じる。こうした GNSS の潜在的な脆弱性を克服するには、透過性の高いミュオンを複数地点で同時検出する等で位置情報を把握する要素技術開発及び技術体系の整理が必要である。また、透過性の高いミュオンにより時刻同期を実現するには、位置情報の推定と同様に、宇宙線ミュオンの複数地点での同時検出が必要となる。これらの技術を将来的に実装していくにあたり、機器の小型化等の要素技術の高度化に加え、技術の応用先に応じて妥当性の検証等を進めることが必要である。

< 構造物イメージング技術 >

これまで火山活動や台風等の深部（基部）観測や大型構造物の非破壊観測には間接的な手法が用いられており、直接観測には大きな制約がある。既に技術提唱がなされている火山活動の深部（基部）や潮位等、自然現象の直接観測や複雑な構造物の革新的な内部観測のためには、イメージング精度の向上、一度に観測できる撮像範囲の広域化、時間的な変化が捉えられる程度に高速なイメージングが可能な要素技術開発及び先端的な要素技術をインテグレートする技術の高度化が必要である。特にインフラ構造物等の短時間又は高精度での検査等には、人工的に生成したより高強度なミュオンの活用も必要となる。したがって、高エネルギーで高強度なミュオンを生成できる可搬システムの開発や応用に係る高強度なミュオンに対応する検出器等の要素技術開発、データ解析技術の高度化等が求められる。また、これらの技術を実装していくにあたっては、技術の応用先に応じて妥当性の検証等を進めることも必要である。

1.3.2 研究開発の具体的内容例

< 測位・時刻同期（PNT）技術 >

- 海底火山の微動観測等、GNSS 通信が不可能な環境下における時空間スケールの小さな cm 級の測位精度、大きな時空間スケールを有する数十 cm～m 級の測位精度等、技術の応用先を念頭に置いた要素技術開発

- GNSS 通信が不可能な環境下におけるネットワーク時刻同期技術及び標準時刻配信技術等の周辺技術を獲得するための要素技術開発
- 当該研究開発を通じて得られた知見や海外を含めた最先端動向の収集、PNT に係る活用環境や想定される精度に応じた技術体系の整理、実装に向けた妥当性検証等

<構造物イメージング技術>

- 火山活動、潮位や、海水密度等の動的な自然現象について、これまでの観測技術を代替・高度化する、広角、短期間でのイメージングやデータ処理・解析等、技術の応用先を念頭に置いた要素技術開発
- インフラ構造物やコンテナ等のイメージングを広角・短時間で実現する検出・解析等の要素技術開発
- 小型・可搬で、人工的に大量のミュオンを生成する再加速技術や、検出器、AI 等を用いたデータ処理等の要素技術開発
- 応用先に応じた技術体系の整理、実装に向けた妥当性検証等

1.3.3 研究開発の達成目標

技術体系の確立を目指すため、産学官によりミュオンを用いた高精度 PNT、構造物イメージング等の要素技術開発や妥当性検証に資する研究を開始する。3 年程度を目途として、それぞれの応用先における技術の妥当性検証や技術移転の可能性把握を進めるための産学官のコミュニティを編成する。

<測位・時刻同期（PNT）技術>

- 各要素技術開発を進め、応用先に応じて PNT に係る技術体系を整理する。研究開発開始から 5 年程度を目途に、PNT 技術等の公共・民生利用の応用先に係る妥当性検証を完了し、技術移転の可能性を把握する。

<構造物イメージング技術>

- 各要素技術開発を進め、動的な自然現象及びインフラ構造物のイメージングの技術体系を確立する。研究開発開始から 5 年程度を目途に、高度化した構造物イメージングの公的・民生利用の応用先に係る妥当性検証や技術移転の可能性把握を完了し、将来的な政府機関、民間企業等での機器調達につなげる。

上述を踏まえ、具体的には提案者の設定した個別の達成目標を基本としつつ、文部科学省及び JST のサポートの下、採択後、研究開発を開始するにあたって行う研究計画の調整にて定める。また、研究開発開始後においては、協議会における意見交換の結果も踏まえ、必要に応じて研究計画の見直しを行う。

2 研究開発の実施方法、実施期間、評価

2.1 研究開発の実施・体制

当該構想のアウトプット目標等をより詳細に設定するため、研究開発対象となり得る技術動向を踏まえ、プログラム・オフィサー（PO）、当該関係分野の有識者、関係府省等による意見交換を経た上で研究公募を行い、研究開発課題を決定する。

PO の指揮・監督の下、研究代表者（研究開発課題の実施責任を法人が担う場合は当該法人を含む。以下同じ。）が研究開発構想の実現に向け責任を持って研究開発を推進する。JST 等の助言に基づき、研究代表者は、適切な技術流出対策を行うよう体制を整備するとともに、研究インテグリティの確保に努め、適切な安全保障貿易管理を行うよう、これらを推進するとともに、研究開発に必要な事項を行う。

研究開発成果を公的利用のみならず民生利用にもつなげていくことを指向し、社会実装や市場の誘導につなげていく視点を重視するという本プログラムの趣旨に則り、研究代表者は PO 及び研究分担者との協議の上、知的財産権の利活用方針を定めることとする。その際には、研究開発途中及び終了後を含め、知的財産権の利活用を円滑に進めることができるように努めることとする。

なお、研究開発成果の利活用にあたりその成果にバックグラウンド知的財産権が含まれる場合には、その利活用についても同様に努めることとする。

2.2 研究開発の実施期間

各研究開発課題の実施期間は原則 5 年以内とする。構想全体で最大 30 億円程度の予算を措置する。

2.3 評価に関する事項

自己評価は毎年実施する。外部評価の実施時期は原則、研究開発の開始から3年目を中間評価、研究開発終了年に最終評価を実施する。具体的な時期については、担当するPOが採択時点でマイルストーンを含む研究計画とともに調整した上で、JSTが決定するものとする。

2.4 社会実装に向けた取組

本構想は、ミュオンを活用した高精度PNT技術や、これまで直接観測できなかった自然現象等の直接観測が可能なイメージング技術の確立により、GNSSを代替する強靱なシステムや、火山活動や潮位観測等の自然現象解明に関する我が国技術の優位性獲得等を目指すものである。このためには、研究代表者と潜在的な社会実装の担い手として想定される関係行政機関や民間企業等との間で、高精度なPNTの技術体系の整理や、これまで観測できなかった自然現象の直接観測技術に係る妥当性検証、技術移転の可能性把握等、実装イメージ及び研究開発の進め方を議論・共有する取組等の伴走支援が有効である。

したがって、今後設置される協議会を活用し、参加者間で機微な情報も含め、社会実装に向けて研究開発を進める上で有用な情報の交換や協議を安心して円滑に行うことのできるパートナーシップを確立することが重要であり、関係者において十分にこの仕組みの運用を検討する必要がある。なお、協議会の詳細は別に示す。また、POは研究マネジメントを実施する際には、協議会における意見交換の結果も踏まえるものとする。