

**令和2(2020)年度 研究拠点形成事業(A. 先端拠点形成型)
中間評価資料(進捗状況報告書)**

1. 概要

研究交流課題名 (和文)	重力波と電磁波多波長観測で挑む未踏未開宇宙		
日本側拠点機関名	東京大学宇宙線研究所		
コーディネーター 所属部局・職名・氏名	宇宙線研究所・准教授・三代木伸二		
相手国側	国名	拠点機関名	コーディネーター所属部局・職名・氏名
	イギリス	University of Glasgow	Institute for Gravitational Research・Professor・Sheila ROWAN
	アメリカ	California Institute of Technology	LIGO Laboratory・Professor・David REITZE
	オーストラリア	Swinburne University of Technology	Center for Astrophysics and Supercomputing・Professor・Matthew BAILES
	台湾	National Tsing-Hua University	Institute of Astronomy・Professor・Albert KONG
	韓国	Ulsan National Institute of Science and Technology	Computational Astrophysics Laboratory・Assistant Professor・Kyujin KWAK
	中国	Beijing Normal University	Department of Astronomy・Professor・Zong-Hong ZHU
	インド	Inter-University Centre for Astronomy and Astrophysics	Astrophysics Division・Professor・Sukanta BOSE
	ベトナム	Hanoi National University for Education	Nanotechnology and Technology Center・Assistant Professor・Nguyen Cao KHANG
	イタリア	European Gravitational Observatory	Professor・Michele PUNTURO
	ドイツ	Max Planck Institute	Albert Einstein Institute・Senior Researcher・Harald LUECK
	フランス	Centre National de la Recherche Scientifique	Astroparticule et Cosmologie Laboratory・Research Director・Matteo BARSUGLIA

2. 研究交流目標

申請時に計画した目標と現時点における達成度について記入してください。

※新型コロナウイルス感染症拡大の影響により、申請時に予定していた共同研究の実施、セミナーの開催及び研究者交流等が困難又は延期せざるを得なかった場合、当初目的の達成に向け代替的に行った取組があれば、その成果も含めて記入してください。

○申請時の研究交流目標

2015年9月14日、人類史上初めて、アメリカの重力波望遠鏡（Advanced (Adv.) LIGO）が連星ブラックホールの合体からの重力波を検出し、その後も2件の同種発生源による重力波信号が報告され、まさに、重力波天文学の創成というべき歴史的時代が始まった。これは、1915年にアインシュタインの一般相対性理論で予測された重力波を、半世紀近い努力の末に直接的に検証した物理学・天文学上の大躍進である。日本においても、この Adv.LIGO とヨーロッパの重力波望遠鏡である Adv.Virgo に並ぶ国際的重力波観測拠点を構築すべく、2010年に「最先端研究基盤事業」として、KAGRA（当時 LCGT）重力波望遠鏡計画が開始された。その後、大規模学術フロンティア促進事業、科研費・特別推進、拠点形成事業などの支援により、2016年に試験運転に成功し、2018年度末の装置の本格稼働、2019年度末の本格観測をめざし、構築作業を加速させてきた。このような重力波“実”観測時代を迎えた今、本拠点形成事業を行う目的は、主に以下の5点に集約される。(1)重力波の波源同定を可能にする Adv.LIGO、Adv.Virgo とのネットワーク観測とデータ解析に関する三拠点の一体的活動、(2)観測データの質的向上のための Adv.LIGO、Adv.Virgo との現世代重力波望遠鏡の改良と安定的運転技術に関する共同研究、(3)重力波発生天体の電磁波多波長観測をより発生早期から行うための協力関係の構築、将来に向けては、(4)国際的次世代極限重力波望遠鏡検討メンバー国との次世代極限重力波望遠鏡のデザインと技術開発に関する共同研究、そして、(5)アジア・オセアニア地域の研究者の KAGRA への参加を促進し、日本の KAGRA を、アジア・オセアニア地区における重力波観測研究拠点としての責務を果たすにふさわしい充実した中核拠点・研究交流拠点にすることである。この重力波研究“創世”期ともいうべき時代のみが提供する爆発的な数の未踏未開宇宙に関する研究の“種”は、特に若手研究者にとって十分魅力的なテーマであり、かつ、活躍できる千載一遇の好機でもあるため、その効果を加速させ、重力波観測研究だけにとどまらない天文・物理に関する多角的視野を有する若手研究者の育成につなげていく。

○目標に対する達成度とその理由

上記目標に対する2カ年分の計画について

※延長対象課題の令和元年(平成31年)度事業については、延長期間終了日までの状況を踏まえること。

- 十分に達成された
概ね達成された
ある程度達成された
ほとんど達成されなかった

【理由】

目標(1)「重力波の波源同定を可能にする Adv.LIGO、Adv.Virgo とのネットワーク観測とデータ解析に関する三拠点の一体的活動」に関しては、KAGRA は2010年から9年の建設期を経て、2019年10月に完成し、同時に LIGO、Virgo の重力波観測施設との間で研究協定を締結し、国際的重力波観測網の一拠点としての活動が開始されるという KAGRA にとっての最重要目標のうちの一つを達成することができた。但し、COVID-19による LIGO-Virgo による共同重力波観測(O3b)の中断で、KAGRA は2019年度中には O3b には

参加できなかったが、2020年4月に、O3bの重力波観測を継続していたGEO600重力波望遠鏡との国際的
重力波観測を実行し（O3GKと呼称）、かつ、現在、その観測中に発生したガンマ線バーストイベントに対
する重力波解析が国際協力のもとに進行している。(2)「観測データの質的向上のためのAdv. LIGO、Adv.
Virgoとの現世代重力波望遠鏡の改良と安定的運転技術に関する共同研究」に関しては、Adv. LIGO及び
Adv. Virgoから多くの研究者がKAGRAを来訪し、様々な技術的指導を若手研究者が受けることにより、
KAGRAの重力波望遠鏡として運用する初期段階の基礎的制御技術の構築のみならず、感度を向上させて
いくコミッシング期においても、初期感度を1000倍以上の改善し、連続運転時間の増大を実現し、
LIGO-Virgoとの国際的重力波観測参加条件を達成する成果につながった。(3)「重力波発生天体の電磁波多
波長観測をより発生早期から行うための協力関係の構築」については、KAGRAは日本の重力波発生天体
に対する電磁波追跡観測ネットワークを行う組織であるJ-JEMと協力関係を構築する成果を上げた。かつ、
先のLIGO-Virgoとの協定締結により、自動的に、世界の電磁波追跡観測ネットワークとの観測連携も成立
することとなった。また、LIGO-Virgoとの国際的重力波観測において重力波イベント候補が発見されたと
同時にそのデータの真偽や重要性を判定するRapid Response Teamに参加する準備も整える成果を上げる
ことができた。(4)「国際的次世代極限重力波望遠鏡検討メンバー国との次世代極限重力波望遠鏡のデザイ
ンと技術開発に関する共同研究」に関しては、まず、ヨーロッパにおける将来の重力波望遠鏡計画である
ET計画の策定準備会議においては、KAGRAで培った低温鏡技術、低温鏡懸架冷却システム、大規模低温
真空槽構築技術、地下施設構築技術、地下環境特徴把握解析において、たびたび招待講演やアドバイスを
求められ、指導的立場で、その実現に必要な知識と経験の共有を行い、さらには、ET計画でも予定されて
いる地下環境の利用に関する類似事例のデータ収集という視点から、KAGRAの地下環境に関する様々な
データの収集活動を共同で行い、様々な指針を提示する成果を上げることができた。一方、主にアメリカ
が中心となって計画しているCosmic Explorer計画に関しても、そのWork Shopにおいて日本から数名の研究
者が招待され、真空や低温技術に関して助言を求められ、その実現に向けて、先導的立場で共同研究を
行うことができた。(5)「アジア・オセアニア地域の研究者のKAGRAへの参加を促進し、日本のKAGRA
を、アジア・オセアニア地区における重力波観測研究拠点としての責務を果たすにふさわしい充実した中
核拠点・研究交流拠点にすること」に関しては、定期的に、KAGRA International Workshop (KIW)を中国、
台湾、韓国で開催することで、各国での共同研究者の数を増加させ、かつ、インド、ベトナムからも参加
しやすくすることで、これらの国においても、共同研究者を増やすことができた。若手研究者の育成に関
しては、KAGRAを中心的に運営している、東大宇宙線研、国立天文台、高エネルギー加速器研究機構だ
けでなく、富山大学、新潟大学、大阪市立大学、東京大学理学部・東京工業大学からの大学院生も多く研
究に参加してもらうことで、彼らの修士・博士の学位取得につなげることができた。この中の複数人が、
国際的研究会議においてポスター賞を獲得し、また、KAGRAで行った開発研究により、日本物理学会学
生優秀発表賞（宇宙線・宇宙物理領域）、日本物理学会若手奨励賞を獲得される人材も現れた。また、国際
的にも、台湾からの大学院生も受け入れ、修士・博士論文のための研究に従事していただいている。これ
ら大学院生の卒業後の進路も、重力波研究を継続する人材もいれば、量子情報、素粒子物理学分野へと多
様化した。また、逆に、ポスドク研究者・若手研究者においては、天体力学、素粒子実験分野からの研究
者がKAGRAに参画し、それまでの異分野での研究経験を活かし特任助教に採用される事例や、LIGOや
Virgoグループに所属する研究機関にスタッフ職やポスドク研究職を得ており、「重力波観測研究だけにと
どまらない天文・物理に関する多角的視野を有する若手研究者」の養成を具現化している。

3. これまでの研究交流活動の進捗状況

※新型コロナウイルス感染症拡大の影響により、申請時に予定していた共同研究の実施、セミナーの開催及び研究者交流等が困難又は延期せざるを得なかった場合、代替的に行った取組があれば、その内容及び成果も含めて記入してください。

- (1) これまでの研究交流活動(延長対象課題の令和元年(平成31年)度事業は延長期間終了日まで)について、「共同研究」、「セミナー」及び「研究者交流」の交流の形態ごとに、派遣及び受入の概要を記入してください。※各年度における派遣及び受入実績については、「中間評価資料(経費関係調書)」に記入してください。

○共同研究

【概要】

1. Adv.LIGO への若手研究者の派遣を行い、環境雑音の取得とそれとの相関解析により重力波信号の選別を行う共同研究を行った。Adv.LIGO の研究者に KAGRA に来ていただき KAGRA のコミッションング・干渉計診断技術開発等で共同研究開発や、環境雑音の取得と、それを利用した重力波データ選別手法の共同研究、雑音源となる施設関連機器の配置・対策の仕方に関する共同研究を行った。一方、重力波望遠鏡のレーザー干渉計制御、及び、感度向上に関する共同研究も行った。結果、KAGRA の重力波望遠鏡として動作させるのに必要なレーザー干渉計としての光学的構成を実現させる鏡間長さの制御をスムーズに導入するためのプロセスの構築、及びそれによって実現された鏡間長さ制御を維持し、重力波望遠鏡として安定的に動作させる制御、そして望遠鏡の安定運転を飛躍的に向上させる光学素子の姿勢制御に成功し、重力波観測可能距離・1kpc を得た。さらにこの観測可能距離を拡大するため、鏡懸架系防振装置の共振制御系の改良、KAGRA と併設されている地殻ひずみ計のデータを用いた長さ制御系の潮汐変位補正技術開発、そして、干渉計内レーザー光量を約 10 倍拡大させる新たな制御系の導入、重力波信号検出光学系の改良などにより、重力波観測可能距離・1Mpc を得て、Adv.LIGO と Adv.Virgo との共同重力波観測網への参加条件を達成した。しかし、その達成直後の 2020 年 3 月 27 日に、COVID-19 の世界的まん延により、Adv.LIGO や Adv.Virgo による重力波共同観測 (O3) が中止となり、KAGRA は Adv.LIGO や Adv.Virgo との同時観測はできなかった。しかし、一方、O3 に参加していた GEO600 重力波望遠鏡は重力波観測を維持していたため、KAGRA は 2020 年度の 4 月に GEO600 と重力波同時観測を行うことを取り決め実行できた。また、並行して、観測中に得た重力波信号データの即時解析、後解析のための計算機システムとプログラム動作、重力波信号の校正を保証するシステム、干渉計の運転状況と環境雑音との比較をリアルタイムで表示し、Adv.LIGO と Adv.Virgo と共有できる環境を構築し、Adv.LIGO と Adv.Virgo との一体的共同観測可能な環境も実現された。その他にも、KAGRA 側の研究者が、アメリカでの第三世代重力波望遠鏡・Cosmic Explorer に関する国際会議に招待され、次世代極限重力波望遠鏡の真空系・低温系に関する共同研究を行った。アメリカで開催された重力波望遠鏡技術に関する国際会議 (GWADW)、および、データ解析に関する国際会議 (GWPAW) に KAGRA から派遣し、現重力波望遠鏡の技術的課題や次世代極限重力波望遠鏡の要素技術開発、データの一体的共有と解析、電磁波フォローアップ観測に関する共同研究を行った。
2. イタリアで行われた本事業セミナー・第 5 回 KIW に日本側から研究者を派遣し、低温鏡とその懸架装置に関する共同研究、次世代極限重力波望遠鏡の建設位置選別、及び、大型低温システムに関する共同研究を EGO と行った。さらに、大学院生をイタリアのローマ大学へ 1 か月派遣し、サファイアブレードの機械的 Q 値測定に関する共同研究を行った。若手研究者を MG15 国

際会議に派遣し、KAGRA の低温鏡懸架装置に関する共同研究を行った。イタリアの研究者に KAGRA に来ていただき、KAGRA のサファイアファイバー懸架部位に関する共同研究を行った。Adv.Virgo グループと EGO とは、上記以外にも、第三代重力波望遠鏡で提案されている鏡冷却技術に関する共同研究を行い、その低温鏡を先駆けて導入している KAGRA において、初めて、低温鏡を用いた km スケールの重力波望遠鏡の実現する成果を上げた。イタリアグループの設計と制御デザインを基盤にした 4 台の Type-A 型鏡防振装置、3 基の Type-Bp 型鏡防振装置、4 基の Type-B 鏡防振装置の共振制御・姿勢制御の最適化作業を行い、KAGRA の長さ制御系との親和性が飛躍的に向上し、KAGRA の安定的運転に貢献した。さらに、第三代重力波望遠鏡で提案されている地下環境利用に関する共同研究も行い、地下における重力雑音や環境雑音の相互共同測定を行い、将来展望への貴重な示唆を得ることに成功した。第三代重力波望遠鏡の低温鏡懸架装置の熱雑音低減の研究開発として、KAGRA から研究者を派遣しイタリアのローマ大学へ派遣し、研究立ち上げ支援を行った。イタリアの Adv.Virgo サイトで開催された ET 計画に関する会議に KAGRA 側から研究者を派遣し、フランス、イギリス、ドイツのグループも交えて、ET 計画と次世代極限重力波望遠鏡に必要とされる要素技術開発に関する共同研究を行うとともに、サイトでのコミッションング作業を行った。ET 計画の候補地において開催された会議では、フランス、イギリス、ドイツのグループも交えて、ET 計画と次世代極限重力波望遠鏡に必要とされる要素技術開発に関する共同研究を行ない、サイト決定に必要な様々な根拠の提案をまとめることができた。

3. イギリスでの低温技術に関する国際会議に大学院生を派遣し、低温環境でも利用可能なシリケート接着に関する共同研究を行い、低温環境でも、十分な強度を確保できる結論を得た。
4. 韓国と、KAGRA で使う入射光学システムや干渉計診断に関する共同研究を行い、入射光学系のモードクリーナーの角度制御開発を行い、安定的なモードクリーナーの運転に成功し、論文に取りまとめた。データ共有・解析に関しても共同研究を行い、KAGRA サイトからの安定したデータ転送環境の維持、および、機械学習を用いたデータ解析手法の開発が行われた。
5. 中国の研究者に、KAGRA・東大宇宙線研・国立天文台・KEK などに滞在していただき共同研究を行った。KEK 及び KAGRA では、低温技術の勉強と、低温装置改良共同実験に参加していただいた。別の中国研究者の方にも、KAGRA にも長期にわたって滞在していただき、入射光学系の位相変調システムの改良が進んだ。さらにもう 1 名の大学院生に長期滞在していただき、サファイア鏡の複屈折計測に従事し、KAGRA で使用されているサファイア鏡の複屈折評価を行った。データ解析に関しては、機械学習を取り入れたコンパクト連星合体からの重力波のデータ解析において、アルゴリズムの改良により、従来の方法に比べて、さらに高速に解析できる手法が開発された。
6. 台湾の天文台に日本側の大学院生、及び若手研究者を派遣し、フォトンキャリブレーター・データ共有・解析、スキージングに関する共同研究を行った。台湾から多くの研究者が断続的に KAGRA などに滞在し、フォトンキャリブレーターの共同研究を行い、完成した。台湾グループメンバーから相当数の人数が相当日数 KAGRA に滞在し、KAGRA の両エンド鏡用のフォトンキャリブレーター、すべてのサファイア鏡の表面モニターシステムの最適化が行われ、先述の O3 参加条件を満たすための校正精度要求の達成を果たした。フリースイングマイケルソン式信号校正技術もその手法が確立され、フォトンキャリブレーターに対する独立な比較対象として、良好な一致を得る成果を上げた。データ共有・解析に関しては、KAGRA サイトからの安定したデー

タ転送環境の維持、および、機械学習を用いたデータ解析手法の開発が行われた。スクイーピングに関しては、当初の周波数無依存型から依存型へのスクイーピング技術への高度化実験を国立天文台において行い、スクイーピング効果の周波数依存性を確認する成果を上げ、将来の KAGRA 改良への十分な根拠を与えることができた。

7. インドに KAGRA の研究者を派遣し、KAGRA の研究紹介を行った。インドの研究機関より、博士研究員を受け入れ、背景重力波データ解析、KAGRA データ解析ツールの整備に関する共同研究開発を開始した。
8. ベトナムに KAGRA の研究者を派遣し、薄膜技術に関する共同研究、学生教育活動を行うとともに、世界の重力波望遠鏡の進行状況とその成果の紹介を行い共同研究者の獲得活動、重力波検出技術を応用した、巨視的量子力学観測のテーマに関する共同研究を行った。ベトナムからも、研究者を招聘し、薄膜コーティングに関する共同研究を行い、損失の少ないコーティングの作成に関する指針を得た。
9. オーストラリアに KAGRA の大学院生を派遣し、低温鏡への水分子の蒸着問題や、量子雑音低減、干渉計不安定問題に関する共同研究を行った。
10. KAGRA の研究者を派遣し、薄膜コーティングの改良に関する共同研究をおこない、KAGRA で必要とされすべてのサファイア鏡を完成させた。その成果により、フランス側も第三世代重力波望遠鏡に利用する鏡機材の候補であるサファイアの単結晶に関する研究開発予算を獲得したことで、KAGRA との大型サファイア基材作成に関する共同研究も別予算で開始された。さらに、KAGRA の日本側メンバーの一人とフランス側のコーディネーターが中心となり、東大と CNRS の間で発足した「IN2P3-UTokyo 共同ラボ」における重力波に関する内容の共同研究も進めることになった。
11. 国内共同研究者によっても、ブラックホールエコー解析、非高調波を利用した重力波データ解析、Adv.LIGO の二台の重力波望遠鏡によって検出された GW170817 イベントに関する両検出波形データの不一致考察、誤検出を低減するための母集団に対する前提を置かないアプローチによる解析手法の開発、GW170817 重力波イベントの波形解析に関する研究を行い、論文として発表された。
12. 第三国となるブラジルに KAGRA の日本側の研究者を派遣し、Adv.LIGO と Adv.Virgo を中心とする世界の重力波研究関係者も協力し、第三世代重力波望遠鏡に関するセミナーを開催し、ブラジルにおける若手研究者への重力波研究の紹介と参加の呼びかけを行った。

○セミナー

	平成30年度	令和元年度
国内開催	3回	3回
海外開催	2回	1回
合計	5回	4回

【概要】

「第4回 KAGRA 国際ワークショップ (KIW4)」が、韓国の主催で、ソウルの梨花大学で 2018 年 6 月 29～30 日に日程で開催された。本ワークショップの開催により、特にアジア各国との共同研究をより一層進めることができた。特に韓国は、KAGRA の重要装置開発を日本のグループとほぼ一体的に行っている。韓国科学技術情報研究院は、Tier1 データセンターとして、iKAGRA 観測以降のデータをミ

ラーしてデータの保全を継続する一方、計算機資源の増強や、そのデータを利用した、重力波信号の信頼性を高めるための干渉計診断技術に関する研究開発も行われた。仁済大学校と梨花女子大学を中心としたグループはデータ解析ソフト開発を進めた。西江大学は、チルトセンサーを開発し、既に KAGRA に導入され、論文もまとめられた。これらの成果と本セミナーの開催により、KAGRA の計画を前倒しての構築が進んだ。また、本セミナーのポスターセッションを開催し、アジアの若手研究者の発表の機会を提供し、研究・発表能力の育成が図られた。

「第 5 回 KAGRA 国際ワークショップ (KIW5)」が、イタリアの主催で、ペルージャのペルージャ大学で 2019 年 2 月 14 日～16 日の日程で開催された。本ワークショップの開催により、Adv.Virgo と Adv.LIGO との同時ネットワーク重力波観測に関する準備が加速され、半年前倒しの実現性が高まった。また、EGO は ET 計画という、次世代極限重力波望遠鏡計画を策定しており、そこで想定されている、「地下環境の利用」と「低温技術の導入」は KAGRA が先駆けて開発している技術であるため、KAGRA の開発状況は ET 計画にとって重要な試金石となることで、次世代極限重力波望遠鏡の要素技術に関する共同開発が進んだ。さらに、ヨーロッパでの開催であるため、次世代極限重力波望遠鏡に想定されるその他の要素技術開発で卓越するイギリス、フランス、ドイツの参加もあり、さらに、次世代極限重力波望遠鏡の共同研究が効率よく進められた。

「第 6 回 KAGRA 国際ワークショップ (KIW6)」が、中国の主催で、武漢の中国科学院武漢物理数学研究所で 2019 年 6 月 21 日～23 日の日程で開催された。本ワークショップでは、Adv.LIGO と Adv.Virgo による重力波同時観測 (O3)、及び、世界の電磁波観測拠点による重力波発生天体追尾観測に、KAGRA も 2019 年度中に参加を果たすべく、そのための KAGRA コミッショニング計画、共同開発研究項目の進展状況の確認、及び、観測開始後の各国共同研究者によるシフト観測体制の構築について議論し、着実な計画の進行状況の確認と、観測シフト案の原案を作成する成果が得られた。本 KIW6 では、特に若手研究者が交流と研究進展の中心となった。また、開催場所の研究所である中国科学院武漢物理数学研究所からは、もともと 1 名の大学院生が、1 年の長期間にわたり KAGRA の入射光学系の構築作業に従事しており、その成果は、日本の若手研究者との共著で、論文の形で取りまとめられ、共同研究成果となった。また、Adv.LIGO と Adv.Virgo から講演者を招待し、O3 及び、両重力波望遠鏡の運転状況の情報収集、及び、KAGRA の O3 参加に向けて必要な感度、データ共有系の構築、信号校正、環境雑音モニタリングシステム構築等の課題項目の確認が行われ、O3 に向け着実に準備していく方針が確認された。また、さらに、本 KIW6 では、中国における、二つの宇宙重力波望遠鏡計画と、地下空間を利用した、原子干渉計を用いた精密重力測定実験、及び、重力波観測装置開発計画も紹介され、特に、後者は、地下環境という KAGRA が先行して開拓してきた施設環境を必要としているため、地下における施設建設の留意点、科学的意義に関する情報交換が活発に行われ、重力波研究以外の研究に関する広がりも得られた。また、本拠点形成事業の中国側の拠点責任者は、武漢大学の教員も併任しているが、武漢大学における重力波研究実験室の立ち上げに関し、KAGRA 側が相談と助言を受け、その支援と交流を進展させることで合意し、果たして、大型研究費を獲得する成果につながり、ますますの研究交流が期待できる成果となった。

さらに、国内では、KAGRA の共同研究の進展状況を確認し、将来の方針を議論しあう KAGRA Face to Face 研究会（言語：英語）を、第 19 回から 24 回まで、大阪市立大学、富山大学、国立天文台、東大宇宙線研究所で年 3 回程度のペースで開催し、その中で、可能な限り学生・若手研究者の発表機会を増やし、かつ、ポスターセッションを開催し、投票で選抜された優秀な発表を表彰した。

「第 19 回目 KAGRA Face to Face 会議」が大阪市立大学で 2018 年 5 月 18 日～5 月 20 日に開催された。会議開催前に KAGRA 重力波望遠鏡の構築過程の中で、重要通過点として設定されていた KAGRA-Phase I

において、最終形態の防振装置で懸架されたサファイア鏡でエンド鏡を構成し、そのうち片方の鏡を冷却した状態での基線長 3km のレーザー干渉計の運転に成功した成果を受けて、この KAGRA-Phase I で予定されていた様々な装置の KAGRA への装着とその性能評価に関する共同研究成果が紹介された。Adv.LIGO から研究者を招待し Adv.LIGO の運転状況や重力波イベント情報に関する情報交換を行った。また、新しく KAGRA に参加する韓国、中国などの研究者の研究紹介とその承認も行われ、共同研究の範囲を拡大することができた。ポスター発表も開催し、主に大学院生を中心に 22 件が発表され、優秀な発表を投票で選び表彰することで、研究へのモチベーションの向上も図った。

「第 20 回目 KAGRA Face to Face 会議」が富山大学で 2018 年 8 月 24 日～8 月 26 日に開催された。2018 年 5 月より開始された KAGRA-Phase II という KAGRA 構築過程で予定されていた様々な装置の KAGRA への装着とその性能評価に関する共同研究成果が紹介された。Adv.Virgo から研究者を招待し Adv.Virgo の運転状況や重力波イベント情報に関する情報交換を行った。新しく KAGRA に参加する韓国、台湾などの研究者の研究紹介とその承認も行われ、共同研究の範囲を拡大することができた。ポスター発表も開催し、主に大学院生を中心に 20 件が発表され、優秀な発表を投票で選び表彰することで、研究へのモチベーションの向上も図った。

「第 21 回 KAGRA Face to Face 会議」が国立天文台で 2018 年 12 月 5 日～12 月 6 日に開催された。前回に引き続き、KAGRA-Phase II で予定されていた様々な装置の KAGRA への装着とその性能評価に関する共同研究成果が紹介された。2019 年 4 月から開始される Adv.LIGO と Adv.Virgo の重力波共同観測に、KAGRA も 2019 年度内に参加すべく、それに必要な構築スケジュール、コミッショニングスケジュール、参加条件に関する議論が行われた。新しく KAGRA に参加する韓国、中国などの研究者の研究紹介とその承認も行われ、共同研究の範囲を拡大することができた。2018 年度に、KAGRA に関連する開発等で修士論文、博士論文の執筆を予定している大学院生に、その研究内容を紹介していただくセッションを設け、より良い論文内容になるためのアドバイスの議論も活発に行われた。ポスター発表も開催し、主に大学院生を中心に 25 件が発表され、優秀な発表を投票で選び表彰することで、研究へのモチベーションの向上も図った。

「第 22 回目 KAGRA Face to Face 会議」が東京大学宇宙線研究所で 2019 年 4 月 19 日～4 月 21 日に開催された。KAGRA で予定されていたほぼすべての装置の設置完了状況と残存する問題点の確認、そして、今後、実際に重力波望遠鏡として運転していくために必要な様々な構成要素の性能や制御の最適化に必要な手順、人員体制、並行に走る項目間のスケジュール調整や確認が行われた。国際共同重力波観測である O3 観測を 2019 年 4 月より開始した Adv.LIGO から研究者を招待し Adv.LIGO の運転状況や重力波イベント情報に関する情報交換を行った。この O3 観測には、KAGRA も 2019 年度中に参加することを目指していたので、その観測時における観測シフト体制に関する参加国間での協議も行われた。Adv.LIGO や Adv.Virgo との重力波観測だけでなく、電磁波観測母体との連携も始まるため、その各波長観測を専門とする研究者を招待し、重力波発生天体との関連についての共同研究もおこなわれた。また、新しく KAGRA に参加する韓国、中国、イタリア、アメリカなどの研究者の研究紹介とその承認も行われ、共同研究の範囲を拡大することができた。ポスター発表も開催し、主に大学院生を中心に 25 件が発表され、優秀な発表を投票で選び表彰することで、研究へのモチベーションの向上も図った。

第 23 回目の「KAGRA Face to Face 会議」が富山大学で 2019 年 8 月 19 日～8 月 21 日に開催された。本セミナーの開催の直前に、S2 で議論された推進計画と国際的な共同活動を背景に、時に、修正を行いながら各装置の最適化を行ってきた結果、KAGRA を重力波望遠鏡として運用する上で最初の重要なマイルストーンともいえる Fabry-Perot Michelson 干渉計での運転に成功し、初めての重力波に対する感度曲線を得る成果を得た。本セミナーでは、特にこの件につき、その詳細な計画推進過程の説明が各装置担当より

発表され、活発な議論と共同研究がなされた。また、すでに、O3 観測は開始して半年になる Adv.LIGO、Adv.Virgo よりも研究者を招待し、観測運転の詳細や、重力波信号候補や、特徴的な重力波イベントに関し発表していただき、その科学的解釈に関する共同研究が行われた。前回同様に、電磁波観測母体の各波長観測を専門とする研究者を招待し、重力波発生天体との関連についての共同研究もおこなわれた。また、新しく KAGRA に参加する韓国、中国などの研究者の研究紹介とその承認も行われ、共同研究の範囲を拡大することができた。ポスター発表も開催し、主に大学院生を中心に 22 件が発表され、優秀な発表を投票で選び表彰することで、研究へのモチベーションの向上も図った。

第 24 回目の「KAGRA Face to Face 会議」が東京大学ビッグバンセンターで 2019 年 12 月 4 日～12 月 5 日に開催された。本セミナー開催の 1 か月前に、KAGRA が重力波望遠鏡としての基礎的運転に成功した前回の成果を背景に、KAGRA も、Adv.LIGO、Adv.Virgo との国際的重力波観測網に参加する協定が 10 月に締結されるという、10 年にわたる KAGRA 建設計画において最も特筆すべき成果が得られた。本セミナーでは、本件について詳細が報告され、国際交流の成果としても高く評価された。一方 KAGRA 自身に関しては、さらなる感度の向上と運転の安定化及び、感度を支配する雑音源に関する共同研究結果が報告された。また、KAGRA が O3 観測に参加するために必要な具体的な準備項目に関し、Adv.LIGO、Adv.Virgo 側と打ち合わせを行い、かつ助言を受け、その準備を加速することができた。2019 年度に、KAGRA に関連する開発等で修士論文、博士論文の執筆を予定している大学院生に、その研究内容を紹介していただくセッションを設け、より良い論文内容になるためのアドバイスの議論も活発に行われた。ポスター発表も開催し、主に大学院生を中心に 25 件が発表され、優秀な発表を投票で選び表彰することで、研究へのモチベーションの向上も図った。

○研究者交流

【概要】

2018 年度、2019 年度とも、日本側の若手研究者・学生を Adv.LIGO や Adv.Virgo 重力波望遠鏡サイトに派遣し、重量波望遠鏡の運転技術・感度向上技術・感度構成要素推定技術・雑音減低減技術・データ解析技術などについて、現地エキスパート研究者、および若手研究者との交流研究活動を行う活動を支援する一方、日本側にも、Adv.LIGO、Adv.Virgo からの研究者を招待し、KAGRA を利用しての同様の研究開発交流を行うことで、交流基盤の強化を図ることができた。これらの交流により、KAGRA の Commissioning が加速され、2019 年 10 月の KAGRA 重力波望遠鏡の完成につながった。この完成を契機に、Adv.LIGO と Adv.Virgo と正式な重力波観測共同研究協定を締結し、KAGRA を重力波観測拠点・交流拠点として世界に広く認知されるようになった。特に、KAGRA の研究開発に深く貢献していただいている台湾・中国・韓国のグループからの研究者や学生の中には、KAGRA のサイトに長期に滞在することで、日本側の研究者と密接に研究開発交流を行ってきた。特にデータ校正システムのハードウェアとその KAGRA への装着に関しては、ほぼ、すべてを台湾グループが担っており、多くの台湾の研究者が KAGRA のサイトで作業された背景で、特に頻繁な人的交流が行われた。ベトナムや、インドからも研究者を招き、特にベトナムに関しては、VAST 所属の研究者に参加していただけることとなり、将来的には、KIW も開催していただける組織拡大も図られ、新たな展開が見られた。

重力波研究に関して特に重要な国際会議としてみなされている、International Conference on General Relativity and Gravitation (GR), Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves (Amaldi), Gravitational Wave Advanced Detector Workshop (GWADW), Gravitational Wave Physics and Analysis Workshop (GWPAW), LIGO-Virgo-KAGRA Meeting (LVK), LISA symposium, Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP), Einstein Telescope Symposium (ET) などを中心に、主に日本側の若手研究者・大学院生を派遣し、Adv.LIGO や Adv.Virgo

の研究者だけではなく、世界の一般相対性理論、重力、重力波、重力波発生天体に関する研究者との交流と活発な議論が行われた。

国際共同研究である KAGRA では、その研究開発推進のため、主に共同研究参加国の中で、中心的な研究機関が主催する KAGRA International Workshop(KIW)を年に 1~2 回、主に日本国内の共同研究機関で開催される Face to Face 会議(F2F)を、年に 2~3 回のペースで開催し、KAGRA の共同研究者間の研究開発交流を継続的に行っている。その会議にも、Adv.LIGO や Adv.Virgo の研究者を招待し、研究開発交流を行っている。特に、若手研究者・大学院生の育成のため、ポスターセッションを必ず開催し、彼らが参加する機会を増やすことで、若手研究者や大学院生間の交流を刺激する工夫をしている。

(2)(1)の研究交流活動を通じて、申請時の計画がどの程度進展したか、以下の観点から記入してください。

○日本側拠点機関及び相手国拠点機関の交流によってえられた、世界的水準の国際研究交流拠点となりうるような学術的価値の高い成果

KAGRA 大型低温重力波望遠鏡は、2019 年度初頭に、計画開始時に予定されていたすべての装置の組み込みが完了し、KAGRA 内の各装置の運用条件の最適化を行うことで、同年 8 月には、ある一定度の光学的構成において重力波望遠鏡としての運用が開始され、建設開始から約 10 年にわたる KAGRA 計画で設定された数ある成果目標の中でも最も特筆すべき成果となった。この重要通過点をもって、LIGO と Virgo と共同で重力波観測を行う重要観測拠点として認知され、今後 LIGO と Virgo と重力波観測を共同で観測に関する協定が同年 10 月に締結され、名実ともに、世界的水準の国際研究交流拠点としての活動が開始されることとなった。

その後も、LIGO と Virgo と GEO600 が参加する第三回重力波望遠鏡共同観測 (O3a と O3b) に参加すべく、1Mpc の重力波感度を目指して性能向上を図り、それが達成された直後、残念ながら、COVID-19 の蔓延により、2020 年 4 月まで予定されていた O3b が 3 月 27 日で中断され、KAGRA との共同観測はならなかった。しかし、O3b 観測を継続していたドイツ・イギリスが中心となって運用している GEO600 重力波望遠鏡は観測を継続していたため、KAGRA は GEO600 との共同重力波観測を 2 週間実行し、その間に発生した大規模なガンマ線イベントと重力波との関連に関する論文を現在取りまとめているところである。

また、Adv.LIGO、Adv.Virgo、KAGRA のような重力波望遠鏡の高周波側の量子雑音を低減することで、重力波に対する感度を向上させる「周波数依存型スクイーミング技術の開発」においては、その原理検証実験においては、Adv.LIGO や Adv.Virgo が先行したが、これら km スケールの重力波望遠鏡で必要とされるスクイーミングの周波数依存性能を、重力波望遠鏡に実装できる形式と規模で初めて技術立証したのは KAGRA の中の日本、台湾、中国、イタリア、ドイツのメンバーであり、その成果は PRL に発表され (Yuhang Zhao, et al., Phys. Rev. Lett., 124(17), 171101, 2020)、かつ Editor's Choice され、本件を博士論文としてまとめた主著者は、総研大 Award を受賞され、プレスリリースを行うなど (<https://www.soken.ac.jp/news/6613/>)、高い評価を得ている。

○研究交流活動の成果から発生した波及効果

KAGRA 大型低温重力波望遠鏡の開発過程で、日本側メンバーが原理を考案し特許を取得した技術思想を利用した超低振動型冷凍機は、重力波望遠鏡だけでなく、他大学における電子顕微鏡の冷却対象物の低振動化による画像の鮮明化や、検出器の低温低振動化が必要な暗黒物質探索用の冷凍機、宇宙マイクロ波背景放射計測用の冷凍機として応用される波及効果があった。また、日本側のメンバーの中から、重力波望遠鏡そのものを応用することで、ある種の暗黒物質探索を従来の検出限界をはるかに超える感度で可能であることが示され、それは PRD 論文として発表され、かつ、その研究テーマは 2020 年度より開始された学術変革研究の計画研究にも選抜されるなどし、従来のようなカリトリックな手法とは全く異なる革新的な暗黒物質探索手法として大きく注目されている。

○若手研究者育成への貢献 (若手研究者が身につけるべき能力・資質等の向上に資する育成プログラムの実施及びその効果)

本事業により、若手研究者や、修士・博士課程の学生を長期にわたり Adv.LIGO や Adv.Virgo の研究機関に派遣し、Adv.LIGO、Adv.Virgo の重力波望遠鏡性能向上実験や、新しい技術導入のための R&D 実験に参加してもらうことで、KAGRA でも生かせる重要な知見や技術を習得していただく一方、KAGRA 側が先導的に行っている低温技術については、むしろ、KAGRA 側の若手研究者が先導する形で、交流相手国でセ

ミナーや実験を行うことで、研究能力だけでなく、指導能力の向上にもつながる派遣活動を行ってきた。また、KAGRA の内部的には、KAGRA の中に内在する様々なチームごとに抱える様々な研究テーマに関する説明会を年に一度開催するなどし、新しく重力波研究に参加してきた大学院生や、特に異なる分野から参入してきたポスドク若手研究者が、重力波研究を俯瞰し、興味あるテーマを選択してもらうことで、研究の動機と将来展望の獲得支援を行ってきた。また、KAGRA で開催する国際会議 KIW（年 2～1 回）や Face to Face 会議（年 2～3 回で会議言語は英語）では、積極的に大学院生や若手研究者に口頭発表していただき、発表数の制限で難しい部分を、必ずポスターセッションを開催することで補い、可能な限り発表する機会を与え、そして、投票によるポスター賞を設定し選抜者を表彰するなどし、研究意欲と説明能力・交流能力の向上も図ってきた。国際会議においても、積極的な参加、口頭発表、ポスター発表のための渡航支援を行ってきた。そのおかげで、一般的な国際会議においてもポスター賞を受賞する研究者も現れ、かつ、海外の研究機関のスタッフやポスドク研究員として受け入れられるなど、研究者としての世界的認知度の向上にもつながっている。

○日本と交流相手国における次世代の中核を担う若手研究者の研究ネットワーク構築状況

KAGRA のサイトに交流相手国の若手研究者や学生に来ていただき、KAGRA の若手研究者や学生と直接やり取りしながら、KAGRA の装置構築・性能向上・データ解析などの多岐にわたるテーマについて議論し、実際の装置を利用することで、重力波望遠鏡の次世代技術開発に必要な基礎から応用発展に至るまでの内容について垣根無く共同研究できる環境を提供したことにより、LIGO や Virgo のような重力波望遠鏡中核機関間の若手研究者間の人的交流はもちろんのこと、アジア各国、ヨーロッパ各国との研究者とのネットワークも拡大し続けている。