

**平成27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

<b>研究交流課題名 (和文)</b>	重力波天文学の創成		
<b>日本側拠点機関名</b>	東京大学宇宙線研究所		
<b>コーディネーター 所属・職・氏名</b>	東京大学宇宙線研究所・教授・川村静児		
<b>相手国側</b>	<b>国名</b>	<b>拠点機関名</b>	<b>コーディネーター所属・職・氏名</b>
	米国	Louisiana State University	College of Science・Professor・Warren JOHNSON
	ドイツ	Max Planck Society	Albert Einstein Institute・Senior Researcher・Harald LUECK
	英国	University of Glasgow	Institute for Gravitational Research・Professor・Sheila ROWAN
	オランダ	NIKHEF	National Institute for Subatomic Physics・Professor・Jo VAN DEN BRAND
	イタリア	European Gravitational Observatory	Professor・Michele PUNTURO
	オーストラリア	University of Western Australia	Faculty of Life and Physical Sciences・Professor・David BLAIR
	韓国	Korea University	Department of Physics・Professor・Tai Hyun YOON
	中国	Beijing Normal University	Astronomy・Professor・Zong-Hong ZHU
	中国	Shanghai Normal University	Shanghai United Center for Astrophysics・Professor・Xiang-Hua ZHAI
	台湾	National Tsing-Hua University	Institute of Photonics Technologies・Professor・Shiuh Chao
	インド	Inter-University Centre for Astronomy and Astrophysics	Astrophysics division・Professor・Sanjeev V. DHURANDHAR
	ベトナム	Hanoi National University of Education	Department of Physics・Associate Professor・NGUYEN Quynh Lan
	フランス	Centre National de la Recherche Scientifique (H27.4より追加)	Laboratoire des Matériaux Avancés・Professor・Gianpietro CAGNOLI

## 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。

### ○申請時の研究交流目標

重力波の存在はアインシュタインの一般相対性理論により100年も前に予言されたが未だ検出には至っていない。もし重力波が検出できれば、ブラックホールの衝突や宇宙誕生の瞬間などこれまで見ることはできなかった様々な天体現象を観測できるようになる。そこで、人類初の重力波検出そして重力波天文学の創成を目指して、平成22年、文部科学省の「最先端研究基盤事業」により、KAGRA 計画が開始された。KAGRA の特徴は、現在建設中の重力波検出器の世界標準である第2世代技術に加えて、『地下設置による地面振動や重力場雑音の低減』、『低温鏡による熱雑音の低減』という、第3世代重力波検出器に必要な2つの技術をとりこんだ点にある。

本研究拠点形成事業の目標は、(1)アメリカの LIGO グループと、KAGRA の第2世代技術を中心とする共同研究を行い、また、(2)ヨーロッパの第3世代検出器 ET 開発グループと KAGRA の第3世代技術を中心とする共同研究を行い、さらに(3)アジア・オセアニア地域の各国の研究者に、KAGRA に本格的に参加してもらうことにより、我が国と世界各国の研究教育拠点機関をつなぐ持続的な協力関係を確立し、世界の重力波ネットワークの中核的拠点、特にアジア・オセアニア地域における研究交流拠点を構築することである。また、これらの国々との双方向の研究者交流やワークショップの開催を通じて、次世代の重力波研究を担う若手研究者を育成する。そして、KAGRA を成功へと導き、最終的に重力波天文学を創成する。また本事業の終了後も中核的な国際研究交流拠点として継続的な研究交流を行い、重力波天文学のさらなる発展を目指していく。

### ○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、

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】

(1)LIGO グループとの間では、先行する Advanced LIGO 検出器の研究に参加することにより、LIGO の各サブシステムの設計やインストレーション・コミッショニングについての重要な情報を得ることができ、それらを KAGRA の建設に役立てることができた。また、LIGO にとっても KAGRA メンバーの参加により、インストレーションやコミッショニングをより内容の濃いものにすることができた。(2)ET グループの間では、『低温鏡』を始めとする第3世代技術に関する共同研究を行った。特に、技術的にもっともチャレンジングだとされる KAGRA の低温鏡懸架システムの要素技術の開発に関しては、ヨーロッパと日本のいくつかの研究機関において、研究者の双方向の訪問による実験が行われ、KAGRA の要求値を満たすことに成功した。また、KAGRA の防振システムの開発も共同研究として行い、これを完成させた。(3)韓国との間では装置、データ解析、検出器評価の各分野において共同研究が行われ、そこで開発された周波数安定化システムが KAGRA の初期段階に使われるなど大きな成果を上げた。また、データ解析のためのコードの開発やニューラルネットワークを用いた検出器特性の評価方法の開発を行った。インド、中国、オーストラリアとの間でも共同研究が継続して推進され、台湾、ベトナムの間では新たに共同研究の立ち上げが行われた。さらに、KAGRA 側の多くの若手研究者を LIGO や ET の研究機関に派遣したり、アジア諸国の若手研究者を日本に招へいしたりすることにより、その育成を行った。

### 3. これまでの研究交流活動の進捗状況

(1)これまで(平成27年3月末まで)の研究交流活動について、「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】

多くの若手研究者を含む KAGRA の研究者が LIGO、Virgo、ET などを遂行する研究機関を訪れ、また、多くの欧米の研究者が KAGRA の研究機関を訪れ、重力波検出の第2世代技術および第3世代技術に関する共同研究を行った。また、国際会議等においては成果発表をするとともに本事業の参加者らと共同研究に関する詳しい議論を行った。また、KAGRA の研究者と韓国の研究者がお互いの研究機関を訪問し共同研究を行った。特に、韓国の若手研究者を長期間招へいした。インド、中国、オーストラリアとの間でも共同研究が行われた。中国からは若手研究者を短期間招へいし KAGRA に関する共同研究を行った。また、台湾、ベトナムとの間では主に KAGRA の研究者が先方に行き、共同研究の立ち上げを行った。

#### ○セミナー

	平成25年度	平成26年度
国内開催	1回	1回
海外開催	0回	0回
合計	1回	1回

##### 【概要】

平成25年6月10日～平成25年6月11日には、第4回韓国日本 KAGRA ワークショップを大阪大学にて開催した。参加者は33人(日本:20人、韓国:12人、台湾:1人)であった。本ワークショップでは、ファイバーリングキャビティを使ったレーザー周波数の安定化およびティルトセンサーの議論がなされた。また、ニューラルネットワークを用いた検出器の特性評価も議論を深めた。また、平成26年6月20日～平成26年6月21日には、第6回韓国日本 KAGRA ワークショップを国立天文台にて開催した。参加者は40人(日本:27人、韓国:12人、中国:1人)であった。本ワークショップでは、韓国が主となって開発した KAGRA の初期段階で使われるファイバーリングキャビティに関する、これまでに得られた結果および今後の進め方についての詳しい検討がされた。また、KAGRA のデータ解析のコードについても議論された。なお、本事業で規定される『セミナー』という形ではないが、韓国において韓国日本 KAGRA ワークショップ、日本において ET グループと KAGRA グループとの間の全体会議(ELITES 会議)が各年度に1回ずつ開催された。

#### ○研究者交流

##### 【概要】

平成25年7月7日～14日に、ポーランドのワルシャワで開催された重力波最大の国際会議である Amaldi 国際会議に KAGRA のメンバーが7人参加し KAGRA に関する発表を行い、本事業に参加している外国からの参加者らと重力波検出に関する議論を行った。また、平成25年7月28日～8月3日には、ベトナムのクイニョンで行われた HTGRG 国際会議に KAGRA メンバー1人が参加し、成果発表を行うとともに、ベトナムとの共同研究の立ち上げの議論を行った。なお、平成26年度よりベトナムは新たに本事業に参加した。平成26年11月17日～22日にはフランスのリオンにて開かれた第6回 ET 国際会議に、KAGRA メンバー3人が参加し、第3世代技術に関する現状報告と議論を行った。また、平成27年2月16日～17日にはフランスの LMA 研究所に KAGRA メンバー1人が訪れ、KAGRA の鏡のコーティングなどについての議論を行った。なお、平成27年度よりフランスは新たに本事業に参加した。

(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、「学術的側面」、「若手研究者の育成」、及び「研究教育拠点の構築」の観点から記入してください。

### ○学術的側面

(1)LIGO グループとの間では、先行する Advanced LIGO 検出器の研究に参加することにより、LIGO の各サブシステムの設計やインストレーション・コミッショニングについての重要な情報を得ることができ、それらを KAGRA の建設に役立てることができた。そのおかげで、KAGRA は、トンネル掘削後1年間で、現在、電気、水、排水システム、空調、光ファイバーネットワーク、防塵塗装、PHS システム、火災警報装置、送風システム、間仕切壁、滴水対策、レーザークリーンルーム、真空槽用クリーンブースなどのインフラ整備の完了、真空パイプ、クライオスタット、真空槽、光学定盤等の大型装置のインストール、初期段階の KAGRA のための入射光学系(2W レーザー、周波数安定化システム、横モードクリーニングシステム)などのインストール、これらすべてを驚くべきスピードで遂行することができた。また、KAGRA の最終段階では180W のハイパワーレーザーを用いる予定であるが、これに耐えられるファラデーアイソレータの開発を行う際には、LIGO のグループが実際に KAGRA の現場に来てくれ、一緒にアセンブリや調整を行ってくれた。また、LIGO にとっても KAGRA メンバーの参加により、インストレーションやコミッショニングをより内容の濃いものにするのができた。例えば KAGRA メンバーが LIGO に滞在中に予備干渉計のフィネスが低すぎて種々の問題が生じていることをシミュレーションで明らかにしたり、KAGRA メンバーがノイズハンティングに関するセミナーを行い、それを参考にして LIGO の感度向上に役立てたりした。

(2)ET グループとの間では、『低温鏡』を始めとする第3世代技術に関する共同研究を行った。特に、技術的にもっともチャレンジングだとされる KAGRA の低温鏡懸架システムの要素技術の開発に関しては、ヨーロッパと日本のいくつかの研究機関において、研究者の双方向の訪問による実験が行われ、KAGRA の要求値を満たすことに成功した。まずは、低温懸架の冷却装置が引き起こす振動がヒートリンクを伝わり低温鏡を揺らす効果を評価した。ET および KAGRA 側で開発した振動計を持ちより、低温における実際の振動測定を行い、要求値を満たすことを確認した。また、低温懸架システムはサファイア鏡とそれを吊るすサファイアファイバーから構成され、強度、熱伝導度、機械的ロスの3つの要求値を満たす必要がある。これは、これまでどこでもやられていない新しい技術であるため、接着剤を含む各コンポーネントの試験を、ET と KAGRA のさまざまな研究機関で行い、最終的に全ての要求値を満たすデザインに到達した。今後は組立及び総合試験と進む予定である。さらに、低温懸架系で使用される低周波垂直防振用の素材についての検討も行い、異種金属の組み合わせにより低温時の特性変化を相殺する手法を提案した。また、防振システムに関しても、KAGRA で使用される倒立振り子の特性を評価し 5Hz で 60dB 以上の防振比を確認した。

(3)韓国との間では、装置、データ解析、検出器評価の各分野において共同研究が行われた。KAGRA の入射光学系に周波数安定化システムのレファランズとして韓国グループと共同でファイバーリングキャビティを開発した。韓国の担当者が大学院生とともに KAGRA の研究機関を訪れ、KAGRA の研究者とともにテスト実験を行った。最終的に、ファイバーリングキャビティによりレーザーの周波数が安定化されていることが、別の基準となる光共振器を使って確認され、この周波数安定化システムが KAGRA の初期段階に使われることになり、現地のシステムにインストールされた。またティルトセンサーに関しても共同研究がおこなわれ、KAGRA の最終段階の鏡の角度検出器の候補として検討されている。また、データ解析に関しては、連星合体重力波信号の候補イベントの検出後に詳細な波形パラメータの推定を行うためのコード開発のための基礎研究を行った。検出器診断についてもニューラルネットワークを用いたより検出効率を上げるツールを開発した。インドの間では、連星合体重力波波形を LIGO, Virgo, KAGRA からなる検出器ネットワークで検出することで、波形を記述するパラメータをどの程度の精度で決定出来るかについて調べた。その結果、完全な波形を用いることでパラメータ間の縮退が一部解けるため、軌道傾斜角と距離の決定精度が向上することが分かった。オーストラリアとの間では、高精度光学系に必要な光学材料と薄膜の微小光学吸収の計測法に関する研究を行った。

## ○若手研究者の育成

多くの若手研究者が、先行する LIGO を訪問し、そこで重力波検出器の開発を一緒に行うことにより多くの事を学び、また貴重な経験を得ることができた。彼らはその経験により世界標準の技術を身につけることができ、さらにそれを KAGRA に適応することによりその技術を自分のものとすることができた。また、多くの若手研究者が ET の研究機関を訪問したり、また ET の研究者が KAGRA の研究機関を訪問したりして一緒に実験を行なった。これにより彼らは技術の融合を実際に体験することができ、KAGRA の技術開発に成功するだけでなく、外国の研究者との共同研究のやり方というものを身につけることができた。また、アジア各国の若手研究者が KAGRA の研究機関を訪れ、ともに KAGRA の研究を行うことにより、KAGRA の技術を身をもって体験し深く理解することができた。これにより、将来は重力波検出の研究をアジアに拡げていくことが期待できる。

## ○研究教育拠点の構築

(1) LIGO グループとの間では、本事業の開始前から比較的強いつながりがあった。実際、日本の重力波グループ出身者が常時数人は LIGO で雇用され研究を行なっている状況である。そして、本事業の開始とともに研究交流の機会が増えそのつながりは一層強くなった。具体的には、KAGRA の成功が重力波天文学の発展に必須であることが広く認識され、LIGO から KAGRA への全面協力の体制が得られたことである。例えば、LIGO のドキュメントは全てパスワードプロテクトがかかっているが、これらを KAGRA メンバーにもアクセス可能にしてくれた。

(2) ET グループとの間では、本事業により非常に強固な研究協力関係を築くことができた。ET グループにとっては、KAGRA の第3世代の技術を共同研究として開発することが、そのまま ET の技術開発につながることから、非常に密接な連携のもと共同研究が遂行された。ET との間では ET と KAGRA の全体会議が毎年開かれ、そこで研究の成果が発表され、今後の計画が議論されている。

また、KAGRA の年2回の F2F 会議には LIGO グループと Virgo グループから講演者を派遣してくれ、KAGRA にとって非常に貴重な Advanced LIGO や Advanced Virgo のインストラクションやコミッションングの話を知ることができた。一方、LIGO と Virgo が共同で開催している年2回の合同会議には KAGRA メンバーが参加し、KAGRA の現状報告を行った。

(3) 韓国との間では、本事業に先立って二国間の共同研究のプログラムにより、研究協力が開始されており、すでに比較的強いつながりがあった。そして、本事業により、その結びつきは一層強くなり、毎年2回の日韓ワークショップを開くなど共同研究を進めている。また、韓国の共同研究者が宇宙線研究所の客員教授として来日し KAGRA の研究を行う際には、本事業により韓国の大学院生も一緒に来日し研究を行った。なお、韓国の研究者はほぼ全員が KAGRA のコラボレーションメンバーとなっている。インドの間でも本事業に先立って二国間の共同研究のプログラムにより研究協力がなされており、本事業によりその関係を継続している。中国との間では、双方向の訪問により、どのような共同研究が可能であるか議論し、その結果、先方の大学院生を短期間日本に招へいし、防振システムの研究を一緒に行った。中国の研究者も KAGRA コラボレーションメンバーとなっている。オーストラリアとの間では本事業の前からハイパワーレーザーに関する共同研究が進められてきたが、KAGRA のハイパワーレーザーの開発はほぼ目途がついたため、現在新しい共同研究の項目について検討を行っているところである。台湾との間では、KAGRA の研究者数人が、台湾物理学会に招待され、KAGRA の講演をし、ディスカッションのセッションでは共同研究の可能性が議論された。そこで、次はミニワークショップを開いてより深い議論を行う事で合意した。ベトナムとの間では、装置やデータ解析において共同研究を行うのだが、現在より詳細な共同研究の項目を議論しているところである。

#### 4. 事業の実施体制

本事業を実施する上での、「日本側拠点機関の実施体制」、「相手国拠点機関との協力体制」、及び「日本側拠点機関の事務支援体制」について記入してください。

##### ○日本側拠点機関の実施体制（拠点機関としての役割・国内の協力機関との協力体制等）

本事業においては、拠点機関に属するコーディネーターをチェアとして、KAGRA 運営室から選出された3人の研究者が参加する拠点形成運営委員会によって共同研究をどのように進めていくかが決められている。3人の委員のうち1人は拠点機関に属する研究者であり、あとの2人別の研究機関に所属する。運営委員会は年度の変わり目に、KAGRA コラボレーションのメンバーに共同研究のための交流の希望を聞き、それらを運営委員会で評価し、採否を決定する。また、アジアからの研究者の日本での滞在費の見積もりと合わせて、その年度の大まかな予算項目を決定する。また、本事業は相手国が多数にわたるため、それぞれの国に対して担当の研究者を設定している。運営委員会のメンバーでほぼすべての国をカバーしているのだが、ベトナムに関しては運営委員以外のメンバー（拠点機関に所属）が窓口となっている。

##### ○相手国拠点機関との協力体制（各国の役割分担・ネットワーク構築状況等）

相手国の拠点機関のコーディネーターは、KAGRA 側の運営委員会と密接に連絡を取りながら、実際の共同研究の遂行を決めていく。具体的には日本への訪問者の日程調整やメンバーの選抜などを行っている。また、会議などでKAGRA 側のコーディネーターと会った際には、今後の共同研究についての議論を行いその方向づけを行っている。

##### ○日本側拠点機関の事務支援体制（拠点機関全体としての事務運営・支援体制等）

拠点機関の事務部の予算系の科研費の担当者が拠点機関としての事務手続きを行っている。また、それとは別に拠点機関の重力波推進室には特任専門職員がおり、出張の手続き、来訪者の滞在先の世話、収支簿の管理、提出書類の事務的事項の執筆などを担当している。