

KAGRA 観測開始へ



大阪工業大学情報科学部・教授
真貝寿明（しんかいひさあき）

25 字 x35 行 x7 段で 6000 字 max

KAGRA（かぐら）は、岐阜県神岡にある重力波検出のためのレーザー干渉計です。一辺が 3 km の腕をもつ装置で、地面振動を抑えるために地下に建設され、熱振動を抑えるために 20 K の極低温で運転される「天文台」です。10 年の年月をかけて、トンネルの掘削・装置のインストール・試運転等を進め、2019 年 10 月に完成記念式典を行ないました。同日、重力波観測をリードしている米国の LIGO、欧州の Virgo の研究グループと共同観測協定 (Memorandum of Agreement, MoA) に調印し、LVK の 3 者による共同研究をスタートさせました。現在、KAGRA はノイズ除去などの最終調整中で、2019 年 12 月には試運転を実施し、共同観測へ参加できるよう準備を急いでいます。ここでは、KAGRA のこれまでの歩みと現状を紹介します¹。

KAGRA 以前の日本の重力波検出プロジェクト

日本での重力波直接検出の試みは、1970 年代から始まりました。90 年代には宇宙線研究所が 100 m 長の delay-line Michelson 干渉計 (TENKO-100) を、国立天文台が 20 m 長の Fabry-Perot 型 Michelson 干渉計をそれぞれ構築し、技術的検討を行いました。前者は光を 102 回往復させ、800Hz から 2.5 kHz の周波数帯で $1.1 \times 10^{-19}/\sqrt{\text{Hz}}$ の感度を出しています。1995 年には、300 m 長の Fabry-Perot 型 Michelson 干渉計 TAMA が国立天文台に建設され、98 年には $5 \times 10^{-21}/\sqrt{\text{Hz}}$ の感度を達成しました。TAMA は、2001 年には 1000 時間以上の運転を行い、2002 年には米国 LIGO の S2 観測と 2 ヶ月間共同で行うなどの実績を残し、最終的な感度は、1 kHz 付近で $1.3 \times 10^{-21}/\sqrt{\text{Hz}}$

¹執筆者は A01 班に所属する研究分担者ですが、現在 KAGRA サイエンス部門会議 (KAGRA Scientific Congress) 実行委員長も担当しており、本稿は後者の立場で執筆します。

を記録しています。レーザー光増幅や地面振動減衰装置などの将来技術開発も行われました。

TAMA のある国立天文台は、東京都内にあり、地面振動や生活雑音のために、100 Hz 以下では感度が望めませんでした。そこで岐阜県神岡の鉱山跡地の山中に建設することが計画されました。予備的なプロジェクトとして、20 m のプロトタイプ干渉計が国立天文台から神岡に移設され、LISM² と命名されて 2000-2002 年に TAMA と同時観測を行っています。



図 1: KAGRA の (a) 概要図と (b) 位置。[(a) 東京大学宇宙線研究所提供, (b) Google map を加工]

KAGRA プロジェクト

2002 年には、100 m 長の辺をもち、サファイア鏡を 20 K の温度に冷却することができる干渉計が神岡に建

²Laser Interferometer Small Observatory in a Mine

設され、CLIO³と命名されます。2005年から2010年
で運用され、東京より2桁以上も地面振動雑音が小さい
ことが示されました。このように、日本の技術は世界を
リードするものでしたが、km-スケールでの大型低温重
力波干渉計 LCGT⁴建設は巨費ゆえ（そして重力波検出
が世界に一例もなかったため）なかなか予算が認められ
ませんでした。梶田隆章氏が宇宙線研究所所長に2008年
に着任し、自らが重力波研究を牽引することで、現在へつ
ながる潮流ができました。LCGT計画は、2010年に初期
建設費140億円が承認され、東日本大震災で遅れが発生
しましたが、2012年にトンネルの掘削に着工しました。
LCGTの名前は一般公募によってKAGRAと決まりました。
「神岡(Kamioka)重力波(GRAvitational wave)天文台」
が由来ですが、日本人なら「神楽」をも連想する
命名です。

図1は、KAGRAの概要図です。岐阜県北端に位置し、
ニュートリノ検出器 Super-Kamiokande と KamLAND
と同じ山の中に建設され、研究所も同じ神岡町茂住に設
置されました。一辺が3kmのレーザー干渉計で、米欧の
干渉計に比べ、技術的に次の2点で進んでいるのが特長
です。一つは低周波数側での地面振動を抑えるために地
下に建設されたこと。KAGRAは少なくとも地表からは
200m地下にあります。鏡の制震装置は、最大で14mの
高さのものになりますが、トンネルを高層に掘って吊り
下げる構造をとっています。地下に建設することのノウ
ハウについては、欧州が計画する次世代の重力波干渉計
Einstein Telescope に活かされることでしょう。もう一つ
は熱雑音を抑えるために鏡を20Kの温度にまで冷却する
ことです。そのために、サファイアの鏡(23kg)が使われ、
ファンのない冷却装置(伝導による冷却)が開発されまし
た。3kmのパイプの中は真空であり、LIGOの2台の干
渉計に次いで世界第3位の大きさの真空装置となってい
ます。さらに、直近の観測では使われませんが、レーザー
光を光源側で増幅したり(power recycling)、検出器側で
増幅する(signal recycling)リサイクリング鏡も取り付け
られています。これらの技術がすべて結集すれば、第2世
代LIGO/Virgoの装置の感度に匹敵する $2 \times 10^{-24} / \sqrt{\text{Hz}}$
を100Hz付近の周波数帯で得られると計画されていま
す。それゆえ、KAGRAは、しばしば2.5世代重力波干
渉計とも称されているのです。

³Cryogenic Laser Interferometer Observatory

⁴Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope

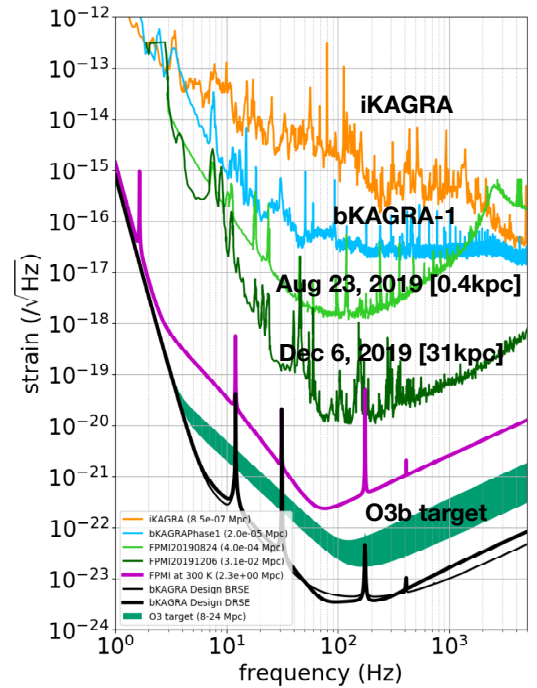


図2: KAGRAの感度曲線(小さいほど感度が良い)。iKAGRA
(2016年4月)、bKAGRA-1(2018年4月)の試運転後、すべての
装置をインストールして、2019年8月23日に初ロック。以
降、調整が続けられていて、本稿執筆時の12月初旬現在では、連
星中性子星の観測領域31kpcまで到達している。LIGO/Virgo
との共同観測に入るためには、あと2桁以上の改善が必要であ
る。[道村唯太氏作成]

トンネルの掘削に2年、そして装置の搬入に2年をか
け、KAGRAは、2016年3月・4月に、単純なMichelson
干渉計の状態、4週間の試運転を行いました。関係者
は、iKAGRA (initial KAGRA)と呼んでいます。そし
て、その後、真空装置・制震装置のアップデートやメイ
ンとなる冷却装置などのインストールを行い、2018年4月・
5月には関係者がbKAGRA (baseline KAGRA) phase-1
と呼ぶ試運転を9日間行いました。鏡を18Kに冷却す
るのに5週間ほどかかること、そしてその温度を1ヵ月
以上保てることを実証しています。この試運転の後半は、
台風なみの低気圧の襲来やハワイでの火山活動や地震に
悩まされましたが、前半は稼働率が88.6%を記録するな
ど安定な運用が報告されました。ただし、干渉計の感度

は低周波領域で TAMA をやっと追い抜くことができる程度でした。

一台の干渉計だけでは、重力波信号を確実にとらえたと断定することは難しいため、KAGRA は LIGO/Virgo の予定している観測予定期間 O3 (2019 年 4 月から 1 年) に間に合うように準備を進めることになりました。補助的な光学系装置や高出力レーザー源などすべての装置のインストールを半年以上予定を早めて 2019 年 4 月に終了し、現在は、装置の最終調整 (commissioning) とノイズ除去 (noise hunting) 作業を進めています (この期間を *phase-2* と呼んでいます)。装置の調整とは、光源側と検出器側のリサイクリング装置を稼働させること、制震装置にフィードバックシステムを入れること、重力波信号のゼロ点更正を行ったり (calibration), 出力信号の質保証を行うこと (detector characterization), データ転送系を整備することなどを指し、ノイズ除去とは、機器や周辺環境から発生するノイズの原因を特定しそれの一つ一つ無くしていく作業です。

2019 年 8 月 23 日には、(リサイクリング装置なしの構成ですが) 初めて干渉計全体がロックし、感度曲線を出すことができました (図 2)。本稿執筆時の 12 月初旬では、連星中性子星の観測領域 31 kpc まで到達しています。目標の感度は、O3 観測期に 10 Mpc です。あと 2 桁以上の感度向上が必要で、干渉計チームが日々努力を続けています。

KAGRA と LIGO-Virgo

KAGRA が O3 への参加検討を始めたのは、2017 年 12 月でした。本新学術領域研究の田中代表からは、2018 年 3 月 21 日に KAGRA に向けて、「KAGRA の O3 参加が実現することを強く望んでいる」とのバックアップメッセージを寄せていただきました。LIGO/Virgo 側からは、KAGRA の参加について歓迎の返信を即座に受け取り、本格的な共同研究体制を築くことになりました。

冒頭で紹介しましたように、LIGO/Virgo/KAGRA は、共同観測・共同研究を行なっていく MoA に調印しました (図 3, 図 4)。KAGRA の観測装置がまだ稼働しておらず、データ解析グループも共同研究を本格的に進めていない状況に関わらず、対等の条件での協定を認めてくれたことに感謝すると共に、相応の貢献がこれから求められていることを感じています。(なお、協定には、KAGRA 干渉計が観測に加わるための条件が付記されました。少

なくとも第 1 世代干渉計 GEO600 を上回らないと、協定の価値に疑問が持たれることから、感度が中性子星連星合体の観測距離 1 Mpc を超えること、とされています。その他、いくつかのデータ信号に関する内部レビューをクリアすれば、その日から共同観測となります)。



図 3: 2019 年 10 月 4 日、富山にて行われた LIGO-Virgo-KAGRA 共同観測協定の調印式での記念撮影。左から EGO 副代表 Christian Olivetto, Virgo スポークスパーソン Jo van den Brand, KAGRA 組織代表 梶田隆章, LIGO 所長 David Reitze, KSC 実行委員長 真貝, KAGRA 組織副代表 大橋正健。[写真提供 飛騨市]

表 1: LIGO, Virgo, KAGRA 研究グループの概要 (2019 年 10 月時)

	LIGO	Virgo	KAGRA
登録研究者数	1330	465	365
論文著者数	860	360	200
グループ数	101	96	110
参加国数	20	8	14

KAGRA グループに所属する研究者は、LIGO/Virgo とのネット会議 (telecon) に参加し、データや文書を交換する体制になりました。各種のネット会議が日々開催されていて、日本時間では深夜や早朝になることもありますが、研究体制がかなり変わりました。LIGO/Virgo のコラボレーション会議 (所属者のみ参加可能) は毎年 3 月と 9 月に開催されていて、350 名ほどの参加者がいます。今後は、KAGRA 研究者もこれに加わり、いずれ日本でも開催されることとなります。3 つのグループの

規模を表 1 にまとめました。各グループとも、研究者数の約半数が、データ解析に関わる人々です。

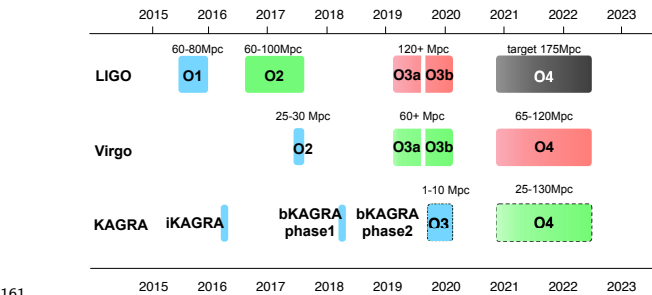


図 4: 観測スケジュール。現在の Observation 3 の期間は、2020 年 4 月末まで。その後、1 年半の期間に各干渉計は装置をアップデートし、O4 を開始する。

本新学術領域研究に参画している研究者のうち、多くの方が KAGRA コラボレーションにも参加しています。これから、研究参加することに興味を持たれた方は、是非、研究者向けの wiki ページ⁵にアクセスされ、ご検討ください。相応の予算のかかった大人数のプロジェクトで、国際的なネットワークとして責任をもって貢献していくために、ある程度、ルールが定められておりますが、その点をご理解いただきたいと存じます。例えば、コラボレーションに新規グループとして参加するときには、研究計画を KAGRA 内部の会議 (Face-to-Face meeting) で表明していただき、審査を受ける必要があります。また、論文のデフォルト著者となるためには、KAGRA に対する貢献に関して毎年内部審査を通過しなければなりません。「理論の研究者でも参加できるのか」とよく質問を受けますが、論文を書く指針やレビュー・将来設計その他に貢献していただくことが期待されています。ご自身で新分野を開拓されることも可能です。

重力波の生のデータに接し、まさに日々、重力波天文学が創成期を迎えていることを実感しています。研究者冥利に尽きる時期にいる、と言えるでしょう。

⁵<http://gwwiki.icrr.u-tokyo.ac.jp/JGWiki/KAGRA>