

BI-1-7

レーザー干渉計型宇宙重力波アンテナ(DECIGO 計画) Space gravitational wave detector (DECIGO & DPF)

武者満^A, 川村静児^B, 安東正樹^C, 瀬戸直樹^C, 佐藤修一^D, 中村卓史^C, 坪野公夫^E, 高島健^F, 船木一幸^F, 沼田健司^G, 神田展行^H, 田中貴浩^I, 井岡邦仁^J, 青柳巧介^K, 我妻一博^B, 浅田秀樹^L, 麻生洋一^B, 新井宏二^M, 新谷昌人^N, 池上健^O, 石川毅彦^F, 石崎秀晴^B, 石徹白晃治^B, 石原秀樹^H, 和泉究^P, 市来浄與^Q, 伊東宏之^R, 伊藤洋介^S, 井上開輝^T, 上田暁俊^B, 植田憲一^A, 歌島昌由^U, 江尻悠美子^V, 榎基宏^W, 戎崎俊一^X, 江里口良治^Y, 大石奈緒子^B, 大河正志^Z, 大橋正健^{AA}, 大原謙一^{AB}, 大淵喜之^B, 岡田健志^E, 岡田則夫^B, 河島信樹^{AC}, 川添史子^{AD}, 河野功^U, 木内建太^K, 岸本直子^{AE}, 國中均^F, 國森裕生^R, 黒田和明^{AA}, 小泉宏之^F, 洪鋒雷^O, 郡和範^{AF}, 穀山涉^B, 苔山圭以子^{AG}, 古在由秀^{AH}, 小島康史^{AI}, 固武慶^B, 小林史歩^{AI}, 西條統之^{AK}, 齊藤遼^E, 坂井真一郎^F, 阪上雅昭^{AL}, 阪田紫帆里^{AM}, 佐合紀親^I, 佐々木節^I, 佐藤孝^Z, 柴田大^I, 真貝寿明^{AN}, 杉山直^Q, 鈴木理恵子^V, 諏訪雄大^E, 宗宮健太郎^M, 祖谷元^{AO}, 高野忠^{AP}, 高橋走^E, 高橋慶太郎^Q, 高橋忠幸^F, 高橋弘毅^{AQ}, 高橋史宜^{AR}, 高橋龍一^L, 高橋竜太郎^B, 高森昭光^N, 田越秀行^{AS}, 田代寛之^C, 谷口敬介^{AT}, 樽家篤史^E, 千葉剛^{AU}, 辻川信二^{AV}, 常定芳基^{AW}, 豊嶋守生^R, 鳥居泰男^B, 内藤勲夫^{BA}, 中尾憲一^H, 中澤知洋^E, 中須賀真一^{AX}, 中野寛之^{AY}, 長野重夫^R, 中村康二^B, 中村真大^A, 中山宣典^{AZ}, 西澤篤志^B, 西田恵里奈^V, 西山和孝^F, 丹羽佳人^B, 能見大河^{AX}, 橋本樹明^F, 端山和大^B, 原田知広^{AK}, 疋田涉^{AS}, 姫木宣朗^{BB}, 平林久^{BA}, 平松尚志^{AA}, 福嶋美津広^B, 藤田龍一^{BC}, 藤本真克^B, 二間瀬敏史^{AF}, 細川瑞彦^R, 堀澤秀之^{BD}, 前田恵一^K, 松原英雄^F, 蓑泰志^M, 宮川治^{AA}, 宮本雲平^{AK}, 三代木伸二^{AA}, 向山信治^{AR}, 森澤理之^C, 森本睦子^{BE}, 森脇成典^{BF}, 八木絢外^C, 山川宏^{BQ}, 山崎利孝^B, 山元一広^{AD}, 柳哲文^{BB}, 横山順一^E, 吉田至順^{AF}, 吉野泰造^{BA}, 若林野花^V, Ke-Xun Sun^{BI}

Mitsuru Musha, et al.

電通大レーザー研^A, 国立天文台^B, 京大理^C, 法大工^D, 東大理^E, JAXA-ISAS^F, NASA^G, 阪市大理^H, 京大基研^I, KEK^J, 早大理工^K, 弘前大理工^L, Caltech^M, 東大地震研^N, 産総研^O, 東大天文^P, 名大理^Q, NICT^R, Univ. of Wisconsin^S, 近大理工^T, JAXA^U, お茶大人間文化^V, 東経大経営^W, 理研^X, 東大総合文化^Y, 新潟大工^Z, 東大宇宙線研^{AA}, 新潟大理^{AB}, 近大 KLC^{AC}, AEI^{AD}, JST^{AE}, 東北大理^{AF}, Birmingham Univ.^{AG}, ぐんま天文台^{AH}, 広大理^{AI}, Liverpool JMU^{AJ}, 立教大理^{AK}, 京大人環^{AL}, Nice Observatory^{AM}, 大工大情報^{AN}, Univ. Tuebingen^{AO}, 日大^{AP}, 長岡技科大経営情報^{AQ}, 東大数物^{AR}, 阪大理^{AS}, UWM^{AT}, 日大文理^{AU}, 東理大^{AV}, 東工大^{AW}, 東大工^{AX}, RIT^{AY}, 防衛大^{AZ}, 無所属^{BA}, 日大生産^{BB}, RRI^{BC}, 東海大工^{BD}, JAXA-JSPEC^{BE}, 東大新領域^{BF}, 京大生存研^{BG}, APCTP^{BI}, Stanford Univ.^{BI}

Institute for Laser Science, Univ. of electro-communications, and others

1. はじめに

巨大質量を持つ天体の運動やブラックホールの形成時に発生し微小な空間の変動として伝搬する重力波はアインシュタインの一般相対整理論で予言されており、検出できれば従来の電磁気とは異なる有用な天体観測の手段となることが期待されている。超新星爆発等の巨大天体現象により発生する重力波でもその空間変動量 dL/L は 10^{22} 以下であり、その小ささにより直接検出は非常に困難であったが、1990年代より各国で長基線マイケルソン型レーザー干渉計による検出が試みられ(LIGO, VIRGO, GEO)、日本でも国立天文台に基線長 300m の Fabry-Perot Michelson 干渉計型重力波検出器(TAMA300)が建設された[1]。しかし現状の検出器の感度では受けられる重力波の発生頻度が低いため、未だ重力波の直接検出成功していない。そのため、直接検出を目指してより感度を高めた次世代の重力波検出計画が立てられており、これらの計画は従来の地上型検出器(adv.LIGO, adv.VIRGO, LCGT)と宇宙空間に建設する重力波検出器(LISA, DECIGO)の2本立てで進められている。宇宙空間では検出時の雑音となる地面振動や重力場の影響が無く非常に長い基線長をとることができるため地上型の検出帯域(10Hz~1kHz)と比べて低い 1Hz 以下の周波数域での重力波検出が可能となる。本発表では日本の次世代宇宙型重力波検出器 DECIGO, DPF とその光源についての解説を行う。

2. DECIGO

DECIGO (Deci-hertz Interferometer gravitational-wave observatory)は地球と同じ太陽周回軌道の上に正三角形に配置された3台の drag-free 衛星で構成された重力波検出器であり、各衛星中に置かれている鏡の間の距離の変動を光干渉により計測する[2]。DECIGO の検出帯域は欧米の宇宙重力波アンテナ(LISA[3])の帯域である 1mHz と地上重力波アンテナ(10Hz~1kHz)の間の 30mHz~30Hz であり、検出帯域を補完するとともに地上型に比べてより変位の大きい重力波源をターゲットにすることができる。目標は宇宙初期からの重力波を検出してインフレーションの存在を確認すること、中性子星連星からの重力波を検出してダークエネルギーの謎を解く事、そして中間質量ブラックホール連星からの重力波を検出して銀河中心の巨大ブラックホール形成のメカニズムを理解する事などである[4]。これらの事象を検出する為に必要な目標変位感度は $dL/L=2 \times 10^{-24} \sqrt{\text{Hz}}$ であり、この変位感度を実現するべくデザインされた DECIGO の構成を図1に示す。各衛星には直径 1m、重さ約 100kg の プルーファマス(鏡)2個があり、各衛星間の鏡の間で長さ 1000km、フィネス 10 の Fabry-Perot 光共振器となっている。これら3組の Fabry-Perot 光共振器で3組の Fabry-Perot Michelson 型干渉計を構成して、重力波に起因する空間変位を各衛星中のプル

一フマス間の距離変動として高精度に検出する。衛星本体は太陽輻射圧や太陽風による外乱を受けるが、プルーフマスは重力波以外のこれらの外乱の影響を受けないようにしなければならない。そのためプルーフマスが外乱から孤立した drag-free と呼ばれる状態にするため、プルーフマスとその周囲のハウジングが一定の距離を保つよう衛星位置を精密に制御する。この干渉計には出力 10W、波長 $\lambda=532\text{nm}$ の単一周波数の連続発振レーザー光源が必要であり、ファイバ増幅器で増幅させた半導体レーザー励起モノリシック型 Nd:YAG レーザー(NPRO)の出力を非線形結晶で波長変換させて使用することを計画している。従来の地上型重力波検出器で使われる光源($\lambda=1064\text{nm}$)より短波長にする理由は、検出感度を上げると同時に長い共振器中でビーム拡がりによる回折損を減らすためである。また観測帯域での干渉計の変位感度は光源の周波数雑音で制限されるため、光源の周波数雑音は $1\text{Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ まで抑圧しなければならない。

宇宙重力波検出器 DECIGO を建設するにあたり、地上で培った重力波検出器の技術とは別に宇宙空間動作特有の技術開発が必要であり、その主な物は上記の drag-free 技術、宇宙空間動作安定化光源、フォーメーションフライト等である。DECIGO は 2027 年完成を目標に計画を進めているが、その技術開発と実証のために 2 段階の前哨計画を立てている。第 1 段階は 1 機の衛星による DPF (DECIGO pathfinder) であり、第 2 段階は、DECIGO と同じ構成のまま衛星間距離を始めとした各パラメータを縮小した pre-DECIGO である。DPF は数年以内の実現を目指して具体的に開発が進んでおり、その DPF の詳細について次に述べる。

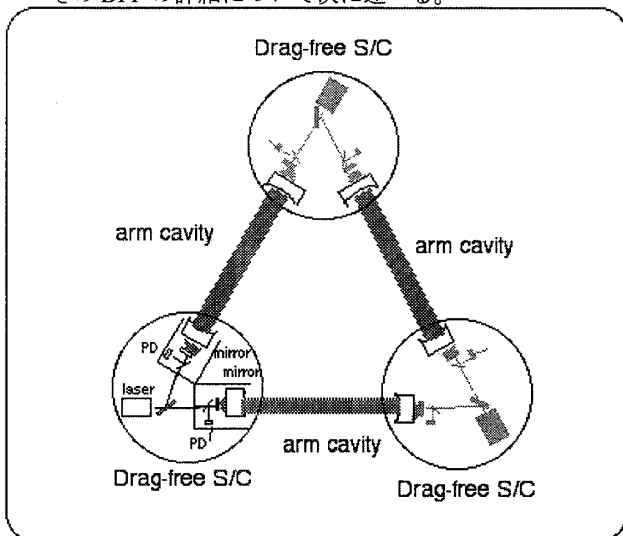


図1 DECIGO 構成図

3.DPF

DPF は安定化光源と Fabry-Perot 共振器を搭載した 1 台の小型衛星であり、DECIGO の為の前哨衛星として主に安定化光源、launch lock、drag-free 制御、そして Fabry-Perot 共振器による精密計測等の要素技術の検証を第一の目的としている [5]。現在は JAXA の小型衛星

計画を利用した最短で 2015 年の打ち上げを目指しており、衛星質量 350g(ミッション質量 150kg)で高度 500km の地球周回軌道で飛行させる予定である。出力 100mW、波長 $\lambda=1030\text{nm}$ の単一波長連続光レーザーを光源として用い、衛星内に drag-free 状態で置かれている 2 個の鏡で構成された Fabry-Perot 光共振器の共振器長の変化として空間変位を検出する。光源の出力は 100mW と低いが、周波数安定度は DECIGO とほぼ同程度の $0.5\text{Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ が必要とされている。この値は地上の実験室環境で得られている最高の周波数安定度レベルであり、我々はヨウ素分子の飽和吸収を周波数基準として用いる事により、この周波数安定度の実現を目指している。ミッション部のハウジングとプルーフマスの相対距離は静電センサーにより測定し、機械振動の大きいモーメンタムホイールの代わりに微小低雑音スラスタを用いて衛星位置を制御することによりプルーフマスを drag-free 状態に保つ。またプルーフマスを打ち上げ時には固定し測定動作開始時に初速度を与えないように浮遊状態にする launch lock の技術の検証も DPF での重要な目的である。DPF で試みている宇宙空間での浮遊鏡による Fabry-Perot 共振器は、Mach-Zehnder 型干渉計を用いた LPF(欧米の宇宙重力波検出器 LISA の前哨機)より高い変位感度が期待されている。我々の銀河中心付近の中間質量ブラックホール合体に起因する重力波が DPF の検出目標であるが、Fabry-Perot 共振器の共振器長が 30cm と短いため目標変位感度は $d\ell/\ell=5\times 10^{-15}/\sqrt{\text{Hz}}$ と DECIGO に比べ低く、実際に重力波を検出することは難しいことが予想される。しかし一方で衛星中のプルーフマスが等地球重力場面に沿って地球周回運動をする事を利用して、現在の最高感度である分解能 1mm 程度で地球重力場解析をすることが可能であり、重力波天文学以外に地球物理学上での科学的貢献が期待される。

- [1] M.Ando, et.al., Phys. Rev. Lett. 86 (2001) 3950
- [2] S.Kawamura, et.al., Class. Quantum Grav. 23 (2006) S19
- [3] LISA Laser Interferometer Space Antenna: A cornerstone Mission for the Observation of Gravitational Wave, System and Technology Study Report, ESA-SCI (2000)11
- [4] N.Seto, S.Kawamura, T.Nakamura, Phys.Rev.Lett. 87 (2001) 221103
- [5] M.Ando, S.Kawamura, S.Sato, et.al., Class. Quantum Grav. 26 (2009) 094019
- [6] M.Armano, et.al. Class. Quantum Grav. 26 (2009) 094001