

研究計画・方法

本欄には、研究目的を達成するための具体的な研究計画・方法について、冒頭にその要旨を記述した上で、平成20年度の計画と平成21年度以降の計画に分けて、適宜文献を引用しつつ、焦点を絞り、具体的かつ明確に記述してください。ここでは、研究が当初計画どおりに進まない時の対応など、多方面からの検討状況について述べるとともに、研究計画を遂行するための研究体制について、研究代表者及び研究分担者の具体的な役割（図表を用いる等）及び研究分担者とともに行う必要がある場合には、学術的観点から研究組織の必要性・妥当性及び研究目的との関連性についても述べてください。また、研究体制の全体像を明らかにするため、連携研究者及び研究協力者（海外共同研究者、科学研究費への応募資格を有しない企業の研究者、大学院生等（氏名、員数を記入することも可））の役割についても必要に応じて記述してください。

● 研究計画の要旨

次世代干渉計方式である RSE (Resonant Sideband Extraction) 方式を導入し、kHz 周波数帯の感度向上と、観測実験に耐えうる安定性を得ることが目標である。これを実現するためには、「**干渉計制御システム的大幅な更新**」を行う必要があるため、以下のように3年間で段階的に**システムの再構築、評価、改良を実施**する。初年度は RSE 導入準備としてシステムの再構築を進め、2年目の夏に RSE 鏡をインストールする予定である。その後、各システムの動作確認を行い、新たな制御システムにより**世界最長基線干渉計での RSE 動作**を目指す。

さらに世界的に誰も手がけていない、RSE 干渉計において鏡アライメントが**重力波検出器感度へ与える影響について定量的な検証実験**を行う。これは鏡アライメント技術の確立に不可欠な研究であり、RSE 方式の様に複雑化した干渉計では実際に干渉計が動作していてこそ得られる貴重な情報である。これら実験の後、**試験運転を重ね長期間の安定性評価と安定動作に必要な改良**を行う。

● RSE (Resonant Sideband Extraction) 方式について

RSE 方式は、現在の TAMA300 の光学系に、反射鏡 (RSE 鏡) を追加することで実現される光学配置である (図 1)。干渉計型重力波検出器において**散雑雑音は「重力波と相互作用する光子の数」と「重力波と相互作用した光子を検出ポートに如何に引き出すか」**で決定される (図 2)。前者は、「パワーリサイクリング技術」により高めることができ、TAMA300 での動作実績がある技術である。

一方、**後者を操作する技術が RSE 方式である**。この方式では、干渉計から重力波検出ポートへ出ていく光を RSE 鏡により反射・共振させ、重力波に対する応答のカットオフ周波数 (図 2 の線が折れ曲がる周波数) を高周波側にシフトさせることが出来る。TAMA300 の場合、すでに 1kHz より高周波側では散雑雑音により感度が制限されているため、これらの技術導入により重力波感度の改善が見込まれる。また、散雑雑音は干渉計の基線長には依らないので **TAMA300 が世界の km 級干渉計と競うためには開発必須の技術**である。

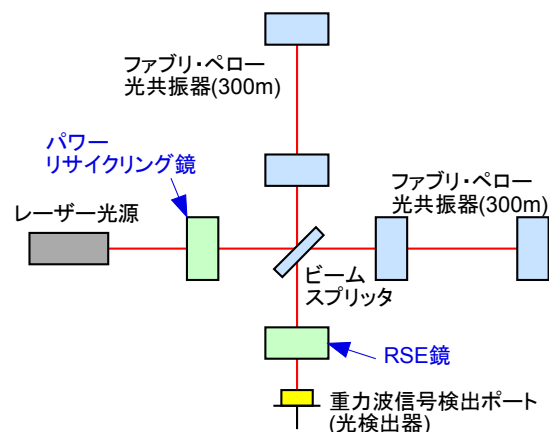


図 1 RSE を適用した TAMA300 の光学配置

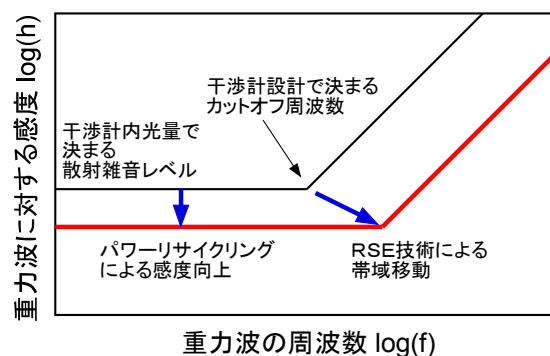


図 2 パワーリサイクリングと RSE による散雑雑音レベルの変動

研究計画・方法（つづき）

● 制御システムの再構築

RSE 方式の採用により光学系は一層の複雑さを増す。そのため、干渉計を重力波検出器として動作させるには、これまでの **TAMA300 の制御システムを抜本的に見直す必要がある**。

変調・復調システム：重力波検出器として干渉計が最高の性能を発揮するには、干渉計を構成する鏡が様々な制御により最適動作点付近に維持されていなければならない。このような制御のため、これまでの TAMA 検出器ではレーザー光に 15.235MHz の位相変調を施し、光検出器から得られた信号を同周波数で復調することで鏡を制御するための情報を得てきた。RSE 方式では鏡が 1 枚増えたことで制御すべき自由度が増加し、**位相変調と強度変調の 2 つの変調が必要**となる。また位相変調器と強度変調器を直列配置することにより不要な変調信号が発生しないように、**マツハ・ツェンダー干渉計を用いた並列変調方式**も取り入れなければならない。さらに変調方式が変わるためほぼ**全ての光検出器の交換**と、光検出器から得られた信号の**2 重復調器が必要**である。これは干渉計の制御系を新規に作るのと同等の大作業である。そのため我々は、現行の干渉計構成のままで変調・復調方式を更新し、これまでと同様に干渉計を動作させる第 1 ステップと、RSE 鏡を追加してさらに制御自由度を増やす第 2 ステップにより**段階的に世界最長基線干渉計での RSE 動作を目指す**。

鏡アライメント制御：鏡アライメント制御とは、鏡の反射面を干渉計として最適な方向を保つ技術である。鏡の僅かな角度揺らぎでも基線長が長くなるほど拡大され、大きな光軸の揺らぎを生じる。重力波検出器はレーザー光の波面を精度良く検出しているため、このような波面の揺らぎが測定に影響を与える。これまで TAMA300 では、上記で説明した位相変調を用いた干渉信号から光波面検出も行ってきたが、これも同じく**2 重変・復調方式に拡張**する必要がある。ただし**このような波面検波方法は世界的に未だに確立された方式ではない**ため、解析的な基礎計算とシュミレーションプログラムを用いた評価を行う。このような基本デザインを行った上で、変調・復調システムと同様の段階的なプロセスを経て、RSE 方式での鏡アライメント技術の確立を目指す。

統合的デジタル制御：図 1 に示した計 7 枚の鏡の動きは、干渉計動作の最適化にとって独立な自由度ではないため**多自由度制御が必須**である。これらの制御を行う上で「**デジタルサーボを用いた統合的制御**」は強力な武器である。干渉計の出力ポートにおかれた光検出器群では、光路長・鏡アライメントの多くの信号が複雑に結合した状態で取得される。また、それらの出力信号は干渉計の状態（例えば RSE 鏡の共振・非共振）によって変化するため、**状態に合わせた制御が必要**となる。このような芸当を実現するには干渉計全体にわたり動作を統括するシステムが必要であり、それにはデジタルシステムを用いるのが最適である。我々は防振装置（TAMA SAS）に導入したデジタル制御システムや 1000 時間観測の際に活躍した自動制御系切り替えシステムの経験を活かし、**新たに統合的多自由度制御システムの構築**を行う。

● 研究推進体制

以上で述べたような RSE 技術を導入し、TAMA300 検出器の感度向上を達成するために、次のような体制で研究項目を分担し計画を推進する。

研究代表者	藤本眞克	研究計画統括
研究分担者	高橋竜太郎	統合的デジタル制御システムの構築、真空系設計・設置
研究分担者	新井宏二	変・復調システム構築、鏡アライメント制御技術の研究
研究分担者	辰巳大輔	RSE 鏡製作、光学系設計、検出器雑音評価
連携研究者	川村静児	制御システムの妥当性検証
研究支援者		RSE における鏡アライメント制御技術の開発研究
研究協力者	大学院生 A	統合的デジタル制御システムの構築

研究計画・方法（つづき）

● 平成 20 年度の研究計画

初年度は **RSE 導入準備** として、RSE 鏡の研磨と成膜試験、真空槽の増設、ならびに変調復調システムの再構築を進める。

RSE 鏡製作：本研究で使用する RSE 鏡は光学的損失が小さくだけでなく、熱雑音を低減するために機械的損失も小さくしなければならない。またレーザー光の波面形状に合わせるため、この鏡の曲率半径を 9 km にする必要がある。このような鏡の研磨と性能評価に約 1 年を費やす。成膜は研磨が終了してからしか行えないため 1 年目はテスト鏡による成膜試験を予定する。辰巳が光学メーカーと交渉して RSE 鏡の製作を進める。

真空槽の増設：新たに真空槽を製作し、RSE 鏡が設置出来るように高橋が指揮して整備を進める。

新変調・復調システム構築：並列変調用マッハ・ツェンダー干渉計・光検出器・2 重復調回路の整備を行い、現行の光学構成で光路長制御の動作確認をする。光学系の整備を辰巳が担当、干渉計の制御実験を新井が担当する。光路長制御の準備に並行して 2 重変復調による鏡アライメント制御方法の検討を進め、光路長制御の動作が確立した時点で、新たなアライメント制御システムの導入を新井および研究支援者が協力して行う。

藤本がこれらの実験・研究の推進状況の統括を行う。

● 平成 21 年度以降の研究計画

世界最長基線干渉計での RSE 動作：2 年目は RSE 鏡を成膜し、平成 21 年度夏頃のインストールを目指す。鏡を支持するための懸架装置は現有のものを流用する。懸架装置の準備および鏡の設置作業は高橋の指揮のもと進める。以上の準備が整った時点で、RSE 方式での干渉計の光路長制御を行う。まずは、RSE 干渉計の腕共振器を除く部分の制御を行い、動作確認する。その状態から腕共振器をひとつひとつ制御していくという段階を踏んで進める。光路長制御の動作が確立されたら、RSE 鏡を含むアライメント制御系の動作確認へと進む。

統合的デジタル制御システム：上記の新しい変・復調システムならびにアライメント制御システムの導入後に、干渉計全体が協調動作するような統合的デジタル制御システムを高橋と大学院生 A で平成 21 年度秋までに構築する。干渉計動作はこれまでの経験を活かして、上記の様な段階を踏んで進めるのでデジタル制御システムもそれに合わせて柔軟に対応する必要がある。

【当初計画どおりに進まない時の対応】ここまでの実験で、光学系のパラメータの不正確さや鏡の位置・姿勢変動の量の多少によって、理論的には予想していなかったような困難が発生する可能性がある。このような場合は計算機による干渉計シミュレーションを用いて発生した現象を分析し、解決法を見出す方針をとる。新システムの動作確認は、問題なく進んだ場合は 5～6 ヶ月程度で済むと思われるが、予想外の困難の可能性を考慮し、12 ヶ月の期間を想定して平成 22 年度夏までかかると予定している。

重力波感度の定量的評価：干渉計が安定に動作するようになったら、藤本の統括のもと全員で協力して、検出器の性能評価を行う。RSE 方式による重力波帯域の変化量、散乱雑音レベルの測定、および各種雑音源の雑音寄与量の測定などを行い、重力波に対する感度がどれだけ向上したかを定量的に評価する。特に RSE 方式における鏡アライメントの重力波感度への影響は世界的に手が付けられていない研究課題であり、新たな知見が得られると期待される。

長期安定動作確立：最後に試験運転を重ねて、干渉計の安定動作、感度の安定度および雑音レベルの非定常性の検証などを行う。さらに長期の安定性が得られるよう改良を重ねる。

研究機関名	国立天文台	研究代表者氏名	藤本 眞克
-------	-------	---------	-------