

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	重力波信号増幅システムにおける光熱効果及び非線形光学効果の研究
Title(English)	Photothermal and nonlinear optical effects in the signal amplification system for a gravitational wave detector
著者(和文)	小田部 荘達
Author(English)	Sotatsu Otabe
出典(和文)	学位:博士(理学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12310号, 授与年月日:2023年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:宗宮 健太郎,上妻 幹旺,佐藤 琢哉,陣内 修,相川 清隆
Citation(English)	Degree:Doctor (Science), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12310号, Conferred date:2023/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

(博士課程)

## 論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	小田部 荘達	
論文審査 審査員		氏名	職名	氏名	職名
	主査	宗宮 健太郎	准教授	相川 清隆	准教授
	審査員	上妻 幹旺	教授		
		佐藤 琢哉	教授		
陣内 修		教授			

### 論文審査の要旨 (2000 字程度)

時空のさざ波として知られる重力波は、これまでに電磁波だけでは分からなかった新しい知見を人類に与えてくれる。中性子星連星の合体後の重力波波形からは、中性子星内部の状態方程式が推定されると期待されているが、現行の重力波望遠鏡の観測帯域より少し高い帯域に信号が現れるため、次世代望遠鏡では、新しい技術を導入して高周波数帯の感度を向上する提案がなされている。その中の一つが、レーザーの輻射圧を介して形成される光バネの共鳴を用いて信号増幅させるというものである。光バネを高周波数帯に出現させるため、干渉計内に光パラメトリック増幅装置を組み込み、位相信号成分を増幅させることで、干渉計内のレーザーパワーを増加させることなく光バネの共鳴を移動させるというものである。

本学位論文では、これまでに提案されていたパラメトリック信号増幅装置を改良した、カスケード非線形効果による信号増幅装置を開発し、光バネの硬化を実験的に証明した。実施した実験は3段階に分かれる。まず、二次のパラメトリック増幅を用いた光バネ硬化実験を行った。光学系は非線形結晶を組み込んだボウタイ型のリング共振器で、光バネを生成するために共振器長は波長の整数倍から僅かに離調されている。干渉計で同相と差動の2モードに分ける重力波望遠鏡と異なり、一つの共振器を用いているため、パラメトリック増幅装置でキャリア光の倍波生成が無視できなくなり、光バネ硬化が観測されることはなかった。ネガティブな結論となったが、他国で類似の実験を実施している研究グループもある中で、先行して結論を出すことができた。二段階目の実験は、光共振器内に組み込まれた非線形結晶の光熱効果の検証である。光共振器の光路長が共振条件よりも短い場合と長い場合とで、熱膨張がもたらす光路長変化により、共振点付近での対称性が崩れる、というのが光熱効果である。光バネが出現する系では、バネの実部と虚部を有意に変化させることが知られている。本学位論文では、光熱効果が光バネにもたらす影響を実験的に検証し、光バネの変化から光熱効果を見積もるという新しい手法を確立した。本実験結果は小田部氏が筆頭著者となり Optical Express 誌に投稿し、2022年に掲載された。三段階目の実験は、カスケード非線形効果を用いた光バネの硬化実験である。カスケード非線形効果は、結晶をキャリア光の位相不整合状態に保つことで実現され、3次の非線形効果である Kerr 効果と同様に、キャリア光の屈折率が共振器内光量によって変化するものである。単一共振器における二次のパラメトリック増幅はキャリア光の倍波生成による光損失で制限されるが、カスケード非線形効果ではその制限が取り払われ、光バネの硬化に適した構成となっている。光熱効果には影響を受けるため、先述の研究結果を組み合わせ、光熱効果を除去した上でカスケード効果単体での光バネの変化を解析したところ、共鳴周波数が1.6倍増加していることを確認することに成功した。以上の3段階の実験結果を総合することにより、パラメトリック増幅による光バネの高周波数帯へのシフトを実証したものであり、次世代重力波望遠鏡にとって重要なマイルストーンとなる研究成果である。また、重力波望遠鏡だけでなく、許容光量に制限のあるオプトメカニカル型の微小信号計測全般に対しても、信号増幅を可能にする新しい手法を提案したことになり、高い学術的価値が認められる。

本論文は7つの章と5つの補遺で構成される。第1章で研究背景と論文の構成と述べた後、第2章で重力波望遠鏡の干渉計構成について説明をしている。第3章では重力波望遠鏡の量子雑音について説明し、これまでに提案されている量子雑音の軽減方法について解説している。第4章では、二次のパラメトリック増幅と光バネを組み合わせ、高周波数帯の重力波に対する感度向上方法について説明すると共に、自身が実施した原理検証実験の手法と結果について詳しく記述している。第5章では、光熱効果について説明し、非線形光学結晶を組み込んだ光共振器において、光熱効果により光バネがどのような影響を受けるか、自身が構築した理論モデルと検証実験の結果を記述している。第6章では、カスケード非線形効果を用いた信号増幅と光バネ硬化について詳しく解説し、自身が実施した信

号増幅実験の結果と、光熱効果を取り除いた上で光バネが硬化していることを示す解析結果をまとめている。

以上のように、本学位論文は、これまでにない方法で重力波望遠鏡の高周波数帯での感度を向上させるという目的を、3つの干渉計実験で実証したものである。それぞれの実験に、高度な制御技術と解析能力が求められ、申請者の研究者としての高い能力が認められる。本研究成果は、重力波望遠鏡だけでなく微小信号計測の幅広い分野での応用が期待され、研究の発展に大きく寄与するものであり、博士（理学）の学位論文として十分に価値のあるものと認められる。

注意：「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。