

## 論文内容の要旨

### 重力波望遠鏡用 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 結晶の光学的性質の研究

{Study of optical properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  crystal  
for a gravitational wave telescope}

氏名 徳成正雄

次世代レーザー干渉計型重力波検出器である LCGT 計画は、熱雑音対策として鏡基材を冷却する計画である。干渉計の基材には優れた特性が必要とされ、極低温で卓越した機械的特性、熱的特性（機械的 Q 値が高く、熱膨張率が低く、熱伝導率が高く、熱レンズ効果が小さい）を備えたサファイアが選択された。

しかし、サファイアには光学的性質に課題があり、その 1 つとして複屈折がある。その非一様性により干渉計のコントラストが下がり、散射雑音の悪化を招く。一様な大型サファイア基材を精製することは一般的に容易ではなく、小さなサイズでは十分な一様性を持つサファイア基材を製造することは達成されているが、LCGT で使用される直径 250 mm、厚さ 150 mm、質量 29 kg もの大きさの基材においても、十分な品質のものが得られるかどうかは不明であった。このため、ここでは大型サファイアでも扱うことが可能な複屈折測定装置を開発した。

複屈折によって生じる現象として、常光と異常光の間に生じる位相差と幾何学的分離がある。これらにより干渉計のコントラストが悪化し、パワーリサイクリングゲインが悪化するという影響がある。これらから、位相差は  $3 \times 10^{-2}$  rad 以下という要請が課されるので、その精度の複屈折測定装置を作ることを目標とした。

測定法は独自に改良した消光法である。複屈折を特徴付ける 2 つのパラメータである Retardation と Orientation の全領域を測定するためには、消光法の基本型である P (偏光子) -C (補償板) -S (試料) -A (検光子) 型では 4 つもの光学素子の回転制御が必要であったが、今回独自に考案した P-C-H ( $\lambda/2$  板) -S-Q ( $\lambda/4$  板) -A 型とすることにより、1 素子の回転だけで全領域測定が可能となった。自動ステージによってサンプル（または光学系）をスキャンすることにより複屈折の 2 次元分布を得た。また、自動化することにより測定を飛躍的に速くすることができた。

米国 LIGO との国際共同研究で、LCGT で用いるサイズと同じ直径 250 mm の大口径サファイアを借用できたので、そのサンプル (sample E) について、またそれ以外の CSI の Hemlite グレードのサンプル (sample A, B, C, D) 等、いくつかのサファイア結晶の複屈折を測定した。測定値

は、形状誤差、熱膨張、屈折率温度依存、機械的応力、熱的応力等の影響ではなく、内在的な複屈折であることが確認できた。

Hemlite の測定から、c 軸サンプルと呼ばれるサンプルでも c 軸と円柱軸のずれが  $0.57^\circ$  もあることが確認され、これにより干渉計のコントラストが LCGT の要請を下回ってしまうため、その対策として c 軸の Orientation とウェッジの方向を  $\phi = 10^\circ$  以内に合わせることが必須であり、それにより問題なくなることがわかった。それは言い換えれば、異常光を減らすということである。

また sample E の一様性は、LCGT のコントラストの要請を満たしていないことがわかった。仮にこのサンプルを LCGT に用いた場合、光損失は 12.7%、散乱雑音の悪化は 34% にもなる。これにより LCGT の干渉計 1 台での連星中性子星の観測領域は 179 Mpc から 156 Mpc となり、検出頻度は 66% に減ってしまうことがわかった。

しかし、sample E で一様性の最も高い部分是要請の 2 倍というところまで迫っていることがわかり、同じグレード (Hemlite) に分類されているものでも 3 倍近い個体差があり、また部位による差も 3 倍以上あることがわかったため、サンプル E が要請を満たさなかったということも原理的な問題ではないように考えられ、本装置による結果を結晶成長にフィードバックすることにより、今後の一様性向上が期待される。

また、ウェッジ角は  $0.5^\circ$  だけつけられればウェッジとしては十分なので、これを仮定して、常光と異常光の分離角を見積もった。鏡のアラインメントの要請 ( $\psi < 1.7 \times 10^{-8}$  rad) を適用すると、c 軸と円柱軸のずれは  $1^\circ$  以内でなければならないことがわかったが、これは今回測定した Hemlite サンプルですでに満たしていた。また、もし a 軸サンプルや m 軸サンプルのように大きな複屈折を持ったサンプルでも、そのオフセット成分によるコントラスト悪化や異常光の幾何学的分離は、ウェッジと c 軸の Orientation を合わせることで問題にならなくなることがわかった。

最後に、本研究独自の方法による複屈折測定装置を用いて、LCGT 用サファイア基材の複屈折を測定し、測定された c 軸の Orientation にそってウェッジをつけることにより、複屈折オフセット成分や異常光の幾何学的分離は問題なくなることがわかった。一方、今回測定された一様性は散乱雑音の悪化を招くという結果だった。しかし、本研究独自の方法による複屈折測定装置が完成したことにより、その測定結果を今後のさらなる結晶の一様性向上のためにフィードバックすることができ、個体差の多いサンプルの中から一様性の最も高いものを選抜することができるようになったことは、LCGT にとって大きな前進であると結論付けられる。