

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15004

研究課題名（和文）熱放射のコヒーレンス測定による温度計測法の開発

研究課題名（英文）Temperature measurement by coherence of thermal radiation

研究代表者

井邊 真俊（Imbe, Masatoshi）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究員

研究者番号：00760191

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：熱放射の空間コヒーレンス測定による温度計測法の研究開発を実施した。空間コヒーレンスと温度の関係の解明と、特に、測定時間や周辺環境へのロバスト性など実用を意識した計測システムの構築を目的とした。そのために、熱放射のような自然光にも適用可能な、光軸方向の空間コヒーレンスの計測が可能な干渉計を新たに提案した。この干渉計を用いて、各温度の物体の空間コヒーレンスを比較し、温度依存性について検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般に、空間コヒーレンス計測はインコヒーレント光源から発生した回折波を対象としている。本研究では熱放射源の空間コヒーレンスを求めるために、計測系および計測対象物体の条件を検討した。また、熱放射のような自然光の光軸方向の空間コヒーレンス計測のための干渉計を創出した。コヒーレンス長を超える空間的なシアを与えることができ、時間コヒーレンスとは独立な計測を実現でき、光コヒーレンストモグラフィのような干渉計測システムの性能評価にも有効と考えられる。

研究成果の概要（英文）：This research was performed to realize thermometry by measuring spatial coherence of thermal radiation. The relation between spatial coherence and temperature of a radiation source as an object was studied, and the interferometer for the measurement of longitudinal spatial coherence of natural light was proposed, which enabled to measure spatial coherence distribution and have robustness against turbulence.

研究分野：計測工学

キーワード：温度計測 干渉計測 コヒーレンス

### 1. 研究開始当初の背景

すべての物体はその温度に応じた電磁波（熱放射）を放出している。放射温度計測ではこの原理に基づき、熱放射の放射輝度を測定して物体の温度を決定する。電磁波を用いた計測であるので、物体に対して非接触であり、かつ、高速な計測が可能という長所をもつ。しかし、放射温度計測には、物体の放射率の情報が別途必要という短所がある。放射率は熱放射の放出の度合いを示す、0より大きく1より小さい物体固有の物性値である。計測原理の基である Planck の式は、黒体、すなわち、放射率が1の理論上の物体の温度と熱放射の関係を定めている。したがって、放射温度計測で温度を決定するためには、物体固有の放射率を把握する必要がある。しかし、放射率はその物体の材質だけでなく、表面の形状や温度にも依存する。さらに、波長や放射の方向によっても異なる値をもつ。そのため、放射温度計測のためには、実際の計測環境における放射率の情報が必要である。しかし、文献にある放射率の値も、その環境に合致した状態で得られたものとは限らない。放射率の正確な値を知ることは困難である。

そこで、本研究では熱放射のコヒーレンスに着目した。一般に、放射温度計測では熱放射はインコヒーレント光として扱う。しかし、現実には熱放射は有限の大きさのコヒーレンスをもつ。時間コヒーレンスについては温度に依存することがわかっている。しかし、現実の物体の場合は、時間コヒーレンスもまた放射率（分光放射率）に依存する。現に、フーリエ分光では、熱放射の時間コヒーレンスの計測により、その時間周波数スペクトルを得ることができる。その、黒体の熱放射の時間周波数スペクトルに対する比から、その物体の分光放射率を求めることができる。これに対して、空間コヒーレンスについては、温度および放射率との関係はともに明らかになっていない。熱放射の空間コヒーレンスが温度にのみ依存し、放射率の影響を受けなければ、先述の放射温度計測の問題を解決できる。すなわち、放射率を必要としない、非接触温度計測技術を実現できる。

### 2. 研究の目的

熱放射の空間コヒーレンス測定による温度計測法の実現を目的とした。空間コヒーレンスと温度の関係を明らかにし、測定時間や周辺環境へのロバスト性など実用を意識した計測システムの構築を目指した。

### 3. 研究の方法

空間コヒーレンスの計測方法を検討した。空間コヒーレンスの定義の説明にも用いられる Young の干渉実験では、2つのピンホールを透過した回折波による干渉縞を撮影する。干渉縞のコントラストとピンホールの位置関係から空間コヒーレンスを算出する。しかし、この方法は、ピンホールの走査が必要な上、その表面と端面からの反射や放射の影響もあるため、実用的とはいえない。そこで、空間コ

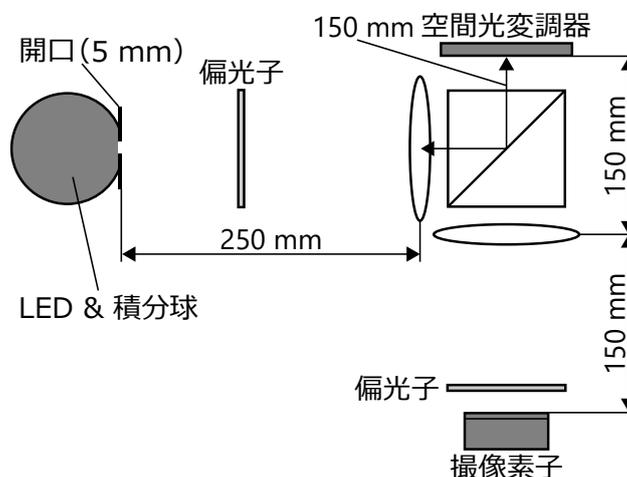


図1 光軸方向の空間コヒーレンス計測が可能な干渉計。

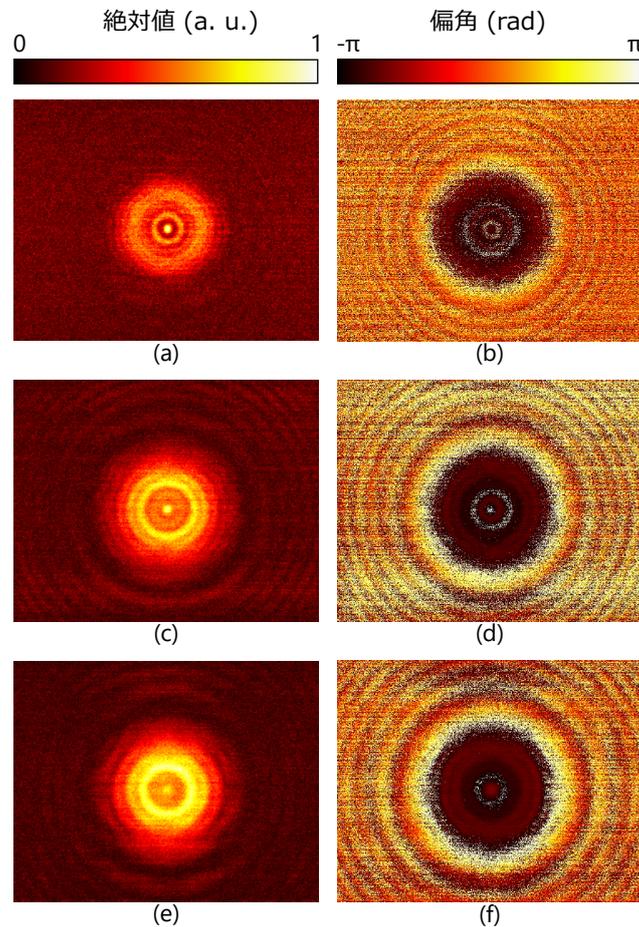


図 2 空間コヒーレンス計測結果: (a), (c), (e) は相互コヒーレンス関数の絶対値であり, (b), (d), (f) は偏角である. 空間光変調器に表示した位相分布の曲率半径は, それぞれ (a), (b)  $-2000$  mm, (c), (d)  $-3000$  mm, (e), (f)  $-4000$  mm である. 相互コヒーレンス関数の絶対値については, 相対的な空間分布を計算機シミュレーションと比較するために, それぞれの最大値で除算して規格化している.

ヒーレンスを一括で計測できる干渉計の構築と, そのための条件について検討した.

一般に, 空間コヒーレンスの計測では, 空間的にインコヒーレントな光源から生じた回折波を対象としている. この場合, 回折波の相関関数は, 少なくともその絶対値については, 広義の定常性をもつ. すなわち, その相関関数は原点の位置に依らない. そのため, 半径方向にシアを与えるラディアル・シアリング干渉計によって, 回折波の空間コヒーレンスを干渉縞のコントラストとして可視化でき, 一括で計測できる. 対して, 本研究では, 光源は空間的に部分コヒーレントとして扱い, その計測を考える. そのため, 一般の回折波の空間コヒーレンス計測の干渉計をそのまま使用することはできないと考えられる. 検討の結果, 光源自体も広義の定常性を備え, かつ, Fresnel 回折による光波の干渉であれば, シアリング干渉による空間コヒーレンスの一括計測が可能と結論づけた. 回折波の空間コヒーレンス自体だけでなく, 一般化された Van Cittert-Zernike の定理より, 光源の空間コヒーレンスも光波伝搬計算により算出できる.

上述の空間コヒーレンスの計測が可能な干渉計について検討した. ラディアル・シアリング干渉計では半径方向, すなわち, 面方向にシアを与えることができる. しかしながら, 空間コヒーレンスは面方向だけでなく光軸方向にも依存する. この方向に対しても計測できれば, 本研究の目的である温度計測に有用と考えられる. Michelson 干渉計では, 光波を 2 つに分割し, 別々の光路長を伝搬させるので, 光軸方向にシアを与えることができ, この方向に対するコヒーレンスを計測できる. しかし, 伝搬距離の違いにより, 時間に対してもシアを与えてしまう. すなわち, 時間コヒーレンスの影響を受けるため, 光軸方向の空間コヒーレンスだけを独立して計測することができない. また, 熱放射のような自然光では, 時間コヒーレンスの低さが, 付与可能な光軸方向のシア量を制限する. そこで, 光軸方向に空間的なシアを与えて空間コヒーレンスを計測できる干渉計を提案した. 過去に提案した熱放射自己干渉ホロ

グラフィで用いた干渉計を基とした。干渉計における2つの光路の全長は同じであるので、時間コヒーレンスの影響を受けない、光軸方向の空間コヒーレンスの計測を可能にした。

上述の干渉計を用いて、空間コヒーレンスと温度の関係を検証した。干渉縞から相互コヒーレンス関数を算出し、温度ごとに比較した。

#### 4. 研究成果

図1に提案した光軸方向の空間コヒーレンスを計測可能な干渉計を示す。LED、積分球、開口を組み合わせて測定対象物体とした。先述のとおり、光源に広義の定常性をもたせるためである。熱放射源では、物体の加熱による温度一様性も考慮する必要があるため、干渉計自体の有効性の検証のために、この組み合わせを計測対象物体として使用した。この物体からの光波を偏光を利用して2つに分割し、片側にのみ空間光変調器により位相変調を与える。その後、偏光子に通して撮像素子面で干渉させる。各光路でそれぞれ物体の回折波を撮像素子面に結像させるが、位相変調によって、光学像の形は不変のまま、位置だけをシフトできる。すなわち、光軸方向に空間的なシアを与えることができる。干渉計全体における2つの光路長は同一であるため、時間コヒーレンスの影響を受けずに、かつ、熱放射のような時間コヒーレンスの低い光の空間コヒーレンスの計測が可能である。空間光変調器に表示する位相を変えることによりシア量を調節できる。

図2にその結果を示す。空間光変調器に表示した二次の位相分布の曲率半径を変えることにより、シア量を変え、それにより得られる干渉縞が変わる。位相シフト法を適用することにより相互コヒーレンス関数を算出し、その絶対値と偏角（位相）を求めた。位相シフトも、空間光変調器により導入した。図2により、相互コヒーレンス関数が、与えたシアに依存して変化していることがわかる。円形開口からの回折波であるため、Airyパターンのように分布していることがわかる。計算機シミュレーションによる回折波の生成結果と比較した結果、空間的な分布は定性的に一致した。したがって、提案した干渉計により、光軸方向の空間コヒーレンスを示す相互コヒーレンス関数を計測可能であることを実証した。また、2つの光路は共通であるため、2光束干渉計と比べ、振動や外乱に強い計測を実現した。

上述の干渉計を用いて、熱放射の相互コヒーレンス関数の計測実験を実施した。相互コヒーレンス関数の空間的な分布と温度の関係を検証した。違いについては、撮像素子の非線形性の影響を伴った。そのため、この影響の評価や分離する方法も検討した。非線形性の小さい撮像素子の導入について検討し、熱型の赤外線カメラを用いた熱赤外域の計測システムの構築も進めた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Masatoshi Imbe	4. 巻 59
2. 論文標題 Spatial axial shearing common-path interferometer for natural light	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 11332-11336
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/AO.410921	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------