

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年4月26日現在

機関番号：16201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011 ～ 2012

課題番号：23651016

 研究課題名（和文） 全方位フーリエ分光イメージング  
 —非整備環境の2次元分光計測への挑戦—

 研究課題名（英文） Omnidirectional Fourier Spectroscopic Imaging - Challenge for 2  
 dimensional Spectroscopic measurement of Daily-life Environment-

研究代表者

石丸 伊知郎 (ISHIMARU ICHIRO)

香川大学・工学部・教授

研究者番号：70325322

研究成果の概要（和文）：

我々は、日常生活空間での環境計測を目指した中赤外全方位フーリエ分光イメージングの実現を目指している。我々が提案している結像型2次元フーリエ分光法は准共通光路型の光学系であるため、高ロバスト、高可搬性であり、インコヒーレント光での分光イメージングが可能である。そのため、物体からの輻射熱である中赤外光を用いることで照明を必要としない小型全方位分光イメージング装置が実現可能である。全方位分光イメージング光学系を構築して、実現可能性を実証した。

研究成果の概要（英文）：

We are aiming at the realization of the omnidirectional Fourier spectroscopic imaging for the daily-life Environmental measurement. Because the proposed imaging-type 2 dimensional Fourier spectroscopy is the near common path interferometer, this method has the high-robustness and the high portability and is capable of the spectroscopic imaging with the incoherent light. Thus, the compact omnidirectional Fourier spectroscopic imaging device of the infrared-radiation can be realized with without the structured illumination. We constructed the omnidirectional Fourier spectroscopic imaging device and demonstrated the feasibility.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

 キーワード：フーリエ分光、分光イメージング、位相シフト干渉、全方位カメラ、広視野イメ  
 ージング、中赤外光、環境計測、衛星

## 1. 研究開始当初の背景

二酸化炭素などの気体は、成分固有の吸収スペクトルを有しており、分光特性からガス成分を特定することができる。しかし、気体の吸収スペクトルは半値幅で0.01nm～

0.1nmの急峻な特性であり、分散型分光方式では計測できず、波数分解能の高いFTIR

(Fourier Transform Infrared

Spectroscopy：フーリエ変換赤外分光法)が適用されている。しかし、FTIRは、2光束干渉であるマイケルソン干渉計により構成されていることから、機械振動などの外乱に対する頑健性が低く、非整備環境下での計測に用いられた例は無かった。また、ポイントでの計測しかできないことから、“いぶき”は測定領域直径180kmスポット内の平均的

な分光特性を計測している。

## 2. 研究の目的

我々は、提案している結像型2次元フーリエ分光法の、非整備環境計測への発展を目指している。フーリエ分光法は、温室効果ガス観測技術衛星”いぶき”に搭載された分光手法であり、急峻なガスの吸収スペクトルを計測できる唯一の手法である。本申請では、大気揺らぎ等、外乱の影響が大きな非整備環境下での全方位2次元フーリエ分光イメージング計測技術へと提案手法を発展させる。これによれば、地上での広範囲な環境モニタリングや、火山などの危険地域の遠隔からの監視、農業地域などの生育状況計測、プラント設備管理技術など、様々な環境や工業計測分野での、広範囲な分光イメージングへの道を切り開くことが可能になる。

## 3. 研究の方法

### (1)低空間周波数画像の高鮮明度化

共役面上での実像への透過型回折格子による一定空間周波数の光学的重畳手法

### (2)双曲面ミラーを用いた高感度広視野分光計測手法

構造化照明を行わない広視野分光イメージング

## 4. 研究成果

### (1)共役面上での実像への透過型回折格子に

よる一定空間周波数の光学的重畳手法

光学的フーリエ変換面上の面内光量分布は、計測対象のテクスチャーによる回折角の違いなどにより偏りを生じることから、干渉鮮明度の空間周波数依存性が避けられなかった。つまり、生体成分濃度分布のみに基づく吸光度分布だけではなく、屈折率分布などの光学的なテクスチャーの違いに応じて、面内計測位置により分光相対強度が異なってしまう。そこで、生体成分の濃度分布のみに基づいて安定的に面内で均一な鮮明度を得るために、アクティブに一定の空間周波数を光学的に重畳する共役面超解像格子法を提案する。これは、物体面と共役な面上の実像に、周期構造である回折格子を設置して一定の空間周波数を光学的に重畳することにより、フーリエ変換面上での光量分布の試料依存性を無くす手法である。しかし、観察画像に設置した回折格子像が投影されてしまう可能性があるため、観察光学系の理論空間周波数と同等のラインアンドスペースにすることにより、回折格子像が結像面上で悪影響しないようにする。本成果報告では、共役面に透過型回折格子を配置する光学系の基本構成と、鮮明度の面内均一化の実証結果について述べる。

### ①鮮明度向上の原理

図1に、前段の共役面結像光学系と、後段

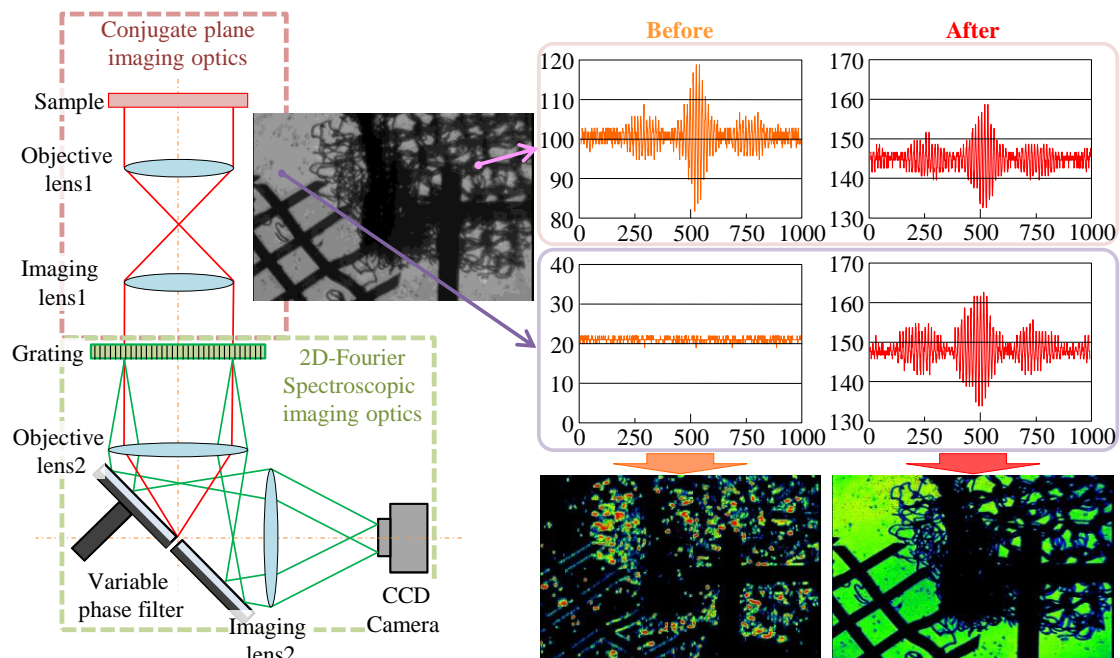


Fig.1 The visibility of the interferogram is increased and is uniformized by introducing the gratin on the conjugate plane to superpose the constant frequency optically

の結像型 2次元フーリエ分光光学系に共通となる共役面に、透過型の回折格子を設置した構成模式図を示す。共役面結像光学系では、対物レンズ 1 と結像レンズ 2 の無限焦点光学系により実像を形成する。この実像に透過型回折格子により一定の空間周波数を光学的に重畳した共役面を、対物レンズ 2 以降の結像型 2次元フーリエ分光法により観察する。

結像型 2次元フーリエ分光法は、対物レンズ 2 の光学的フーリエ変換面に、物体光束を波面分割して任意の位相差を与える位相可変フィルターを配置している。この位相可変フィルターの可動ミラー部と固定ミラー部に、透過型回折格子の±1 次回折光が均等に照射される為、安定的に高い鮮明度を確保することが可能になる。

### ②共役面超解像格子の空間周波数決定方法

本光学系設計の特徴は、共役面結像光学系に関しては適用対象に応じて個別に設計を行うが、共役面超解像格子を含む結像型 2次元フーリエ分光光学系は常に同じ光学系で良い点である。これは、共役面上での実像の大きさを常に一定にするように共役面結像光学系の倍率を設定すれば良いためである。

まず、共役面結像光学系の対物レンズの N.A. (数値開口数: Numerical Aperture) は、適用対象に求められる解像度から決定される。また求められる視野サイズと、予め設定されている共役面での実像の大きさから共役面結像光学系の倍率が求まり結像レンズが決定される。後述の検証実験では、現有の結像型 2次元フーリエ分光光学系 (対物レンズ N.A.: 0.42、倍率: 5 倍) の理論空間解像度  $1\mu\text{m}$  を目安に、手持ちの透過型位相格子 (格子周期:  $5\mu\text{m}$ ) を用いた。また、視野  $3.5 \times 2.6\text{mm}$ 、解像度  $2\mu\text{m}$  として、共役面結像光学系の倍率 2.5 倍、対物レンズ N.A.: 0.196 とした。なお、受光デバイスには白黒カメラモジュール (メーカー: SONY、型式: XC-77、画素サイズ:  $11\mu\text{m}$ )、白色光源にはメタルハライドランプ (メーカー: シグマ光機株式会社、

型式: IMH-250) を使用している。

### ③鮮明度の面内均一化実証実験結果

本検証実験では、観察視野内で多様な空間周波数を含むサンプルを作成した。具体的には、空間周波数の低い極端な例としてテクスチャーの無いスライドガラスを基板にして、細い繊維でランダムな空間周波数を形成した。図 1 右に観察視野内での相対強度分布を示す。これは各画素におけるインターフェログラムの振幅値を擬似カラーで表示している。この振幅値が空間周波数に依らずに、つまり観察面内で均一であれば良い。図中左下の回折格子を重畳しない従来手法の場合は、面内で鮮明度の大きな違いを生じてしまい、特に、テクスチャーの無いガラス基板の領域では、干渉すら生じないことから黒く表示されている。しかし、図中右下の共役面超解像格子法では、繊維上は陰となることから干渉せず黒く表示されているが、テクスチャーの無い領域から様々な間隔の繊維間の領域に渡り全体が均一な緑色で表されており、一様な干渉強度分布を得ていることが確認できた。

### (3)双曲面ミラーを用いた高感度広視野分光計測手法

図 2 に、構成した全方位分光イメージング光学系の観察領域と模式図及び観察像を示す。本光学系は共役面結像光学系と結像型 2次元フーリエ分光光学系で構成している。特徴として、視野を広くすることにより 1 画素辺りのエネルギー密度が高くなり計測感度が低く、比較的安価であるマイクロボロメータタイプの受光素子での計測が可能である。共役面結像光学系は、双曲面ミラーにより反射された物体光を対物レンズの共役面に設置している共役面超解像格子に結像させる。この時、物体像を格子像に重畳し、位相可変フィルターにより物体光間位相シフト干渉を生じさせることで鮮明度の高い分光特性を取得できる。

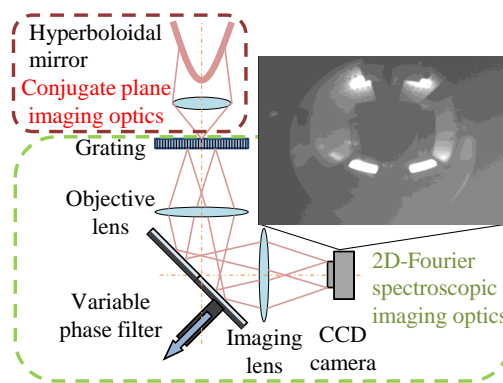
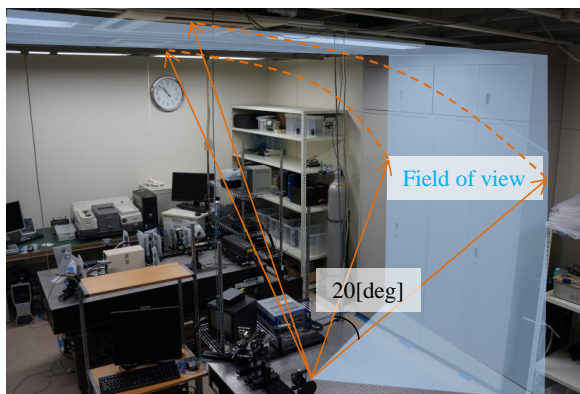


Fig.2 Field of view of the hyperboloidal mirror and camera image

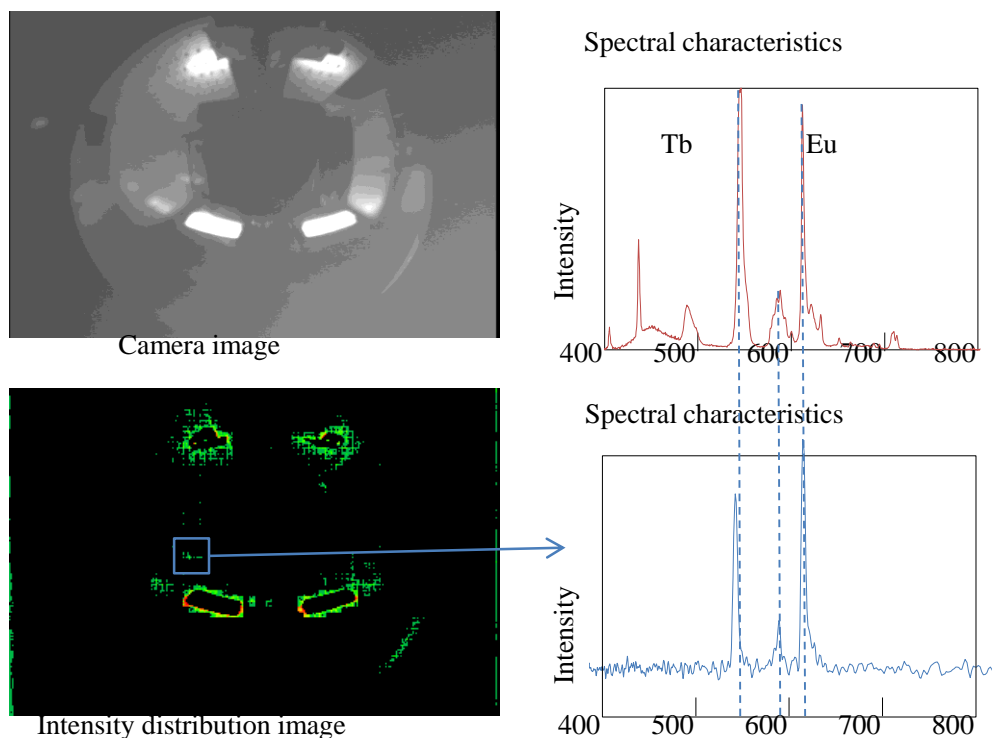


Fig.3 Confirmation of the interference intensity and the spectral characteristics

①一般照明光による全方位分光イメージング

本検証実験では、双曲面ミラー（視野:20[deg]）の全領域が共役面格子に投影されるように共役面結像光学系の倍率を0.15倍とし、共役面超解像格子（開口幅:9 $\mu$ m、遮光幅:5 $\mu$ m）を用いた。本実証実験は、実験室内の風景を観察し分光イメージングを行った。この際、蛍光灯のみで計測を行った。図3に実験結果を示す。干渉強度変化を疑似カラー化した相対強度可視化画像から、観察像内で干渉強度変化が生じていることを確認した。また、光源と分光特性の比較を行い、蛍光物質TbとEu特有のピークを確認した。

我々は、可視光全方位分光イメージング光学系を構築し、一般照明光での全方位分光イメージングの実現可能性を実証した。今後、物体自体の熱から生じた光であり、成分判別に適した波長帯域である輻射熱による中赤外全方位分光イメージングを行う予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 1 件）

[1]小林宏明、河尻武、矢野川果奈、西山成、田中直孝、高橋悟、石丸伊知郎、”結像型2次元フーリエ分光法による分光断層像計測技術”、光学、41巻、1号pp. 36-44(2012. 1)（査読有）

〔学会発表〕（計 5 件）

[1]佐藤駿、藤原大、Kumara Praveen、鈴木聡、西山成、石丸伊知郎、日常生活空間で利用できる超小型ワンショット分光断層像計測装置（第二報）-高鮮明度化と高頑健性を保証する機能性共役面位相シフト格子法-、第60回応用物理学会春季学術講演会、29a-A2-11(2013. 3. 21)

[2]鈴木陽、堤良介、齊威、小島大輔、佐藤駿、平松裕行、石丸伊知郎、日常生活空間での環境計測を目指した可搬型中赤外全方位分光イメージング装置、第60回応用物理学会春季学術講演会、29p-A2-10(2013. 3. 21)

[3]石丸伊知郎、親指サイズの超小型赤外分光断層イメージング装置による生体成分定量化技術、レーザー学会関西支部第3回研究会(2012. 11. 15) 【招待講演】

[4]鈴木陽、堤良介、QI Wei、小島大輔、佐藤駿、鈴木聡、Pradeep K. W. Abeygunawardhana、西山成、石丸伊知郎、共役面超解像格子によるフーリエ分光断層イメージングの高鮮明度化、日本光学会 Optics & Photonics Japan2012、24aA8(2012. 10. 21)

[5]Ryosuke TSUTSUMI, Asuka INUI, Wei QI, Takashi TAKUMA, and Ichiro ISHIMARU, Fourier-Spectroscopic Imaging for Global Greenhouse Gas Observation, Proc. of 20th IMEKO TC2Symposium on Photonics in Measurement, pp. 95-100 (2011. 5. 20)

〔産業財産権〕

○出願状況（計 10 件）

名称：生体成分測定装置及び生体成分測定方法

発明者：石丸伊知郎

権利者：香川大学

種類：特許

番号：特願 2012-044272

出願年月日：2012 年 2 月 29 日

国内外の別：PCT 出願

○取得状況（計 4 件）

名称：立体形状測定装置

発明者：石丸伊知郎

権利者：香川大学

種類：特許

番号：特許第 4555925 号

取得年月日：2010 年 7 月 30 日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ

○かがわ健康関連製品開発フォーラム

<http://www.medfere.com/index.html>

本申請の技術などを核として、香川県では実  
利用化による新産業創出を目指している。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

石丸 伊知郎 (ISHIMARU ICHIRO)

香川大学・工学部・教授

研究者番号：70325322