

機関番号：74417

研究種目：特別研究促進費、基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20519004

研究課題名（和文） 黄砂付着汚染物質検知に向けたリモートエリプソメトリー技術の開発

研究課題名（英文） Development of remote ellipsometry for detecting pollution Asian dust

研究代表者

染川 智弘 (SOMEKAWA TOSHIHIRO)

財団法人レーザー技術総合研究所 レーザー加工計測研究チーム 研究員

研究者番号：00508442

研究成果の概要（和文）：高強度フェムト秒レーザーを Kr ガスに集光して得られる超広帯域コヒーレント白色光をエリプソメトリー手法であるチャネルド分光偏光計測に応用した。1 回のスペクトル測定から 450-700 nm の広帯域で偏光ストークスパラメータの決定に成功し、6 桁の強度減衰に対しても 10 %程度の精度で復調できることを示した。コヒーレント白色光を光源に用いることで、リモートでエリプソメトリーを実現できる可能性を示せた。

研究成果の概要（英文）：We carry out polarization measurements using a coherent white light continuum generated in Kr gas by a terawatt femtosecond laser system as a light source for channeled spectropolarimetry. The complete set of Stokes parameters from 450-700 nm are reconstructed from one spectral measurement. The effectiveness of channeled spectropolarimetry is experimentally demonstrated with a highly attenuating sample whose transmittance is as low as  $10^{-6}$ . The channeled spectropolarimetry using the coherent white light continuum provide potentiality to realize the remote ellipsometry that have many applications such as lidar measurements.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,300,000	0	2,300,000
2009 年度	600,000	180,000	780,000
2010 年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,500,000	360,000	3,860,000

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：フェムト秒レーザー、コヒーレント白色光、ライダー、エリプソメトリー、黄砂

## 1. 研究開始当初の背景

3～6月にかけて日本にも他数回飛来する黄砂は、その発生メカニズム、飛来ルート、環境への影響を解明することを目的として研究が行われており、レーザーを用いた遠隔計測（ライダー）は得られる高さ方向の情報、リアルタイム観測が特徴として研究が推進

されている。黄砂は一般的に非球形の微粒子であり、レーザーの偏光を用いた観測が行われ、日本、中国、韓国、モンゴルと国際的なネットワークが形成され、その解析結果が報告されている (Murayama et al. 2001)。

これまで自然現象だと理解されていたが、中国での過放牧、農地転換による耕地拡大等

による人為的影響として再認識されつつあり、農作物などの砂塵被害だけでなく、輸送途中で人為起源の大気汚染物質の付着により、のどの痛みやせき、鼻水など花粉症に似た症状を訴える患者が急増している等、アレルギー体質の悪化を招いている (Var et al. 2000; Kim et al. 2003)。こうした黄砂の組成分析には、大気中の黄砂を航空機などで捕集し、イオンクロマトグラフィー、X線蛍光法などで分析されているが、煩雑な前処理が必要であり、測定結果がでるまでかなりの時間を要する。一方で、偏光を用いたライダーではリアルタイムな観測が行えるが、観測の工程が複雑で測定に時間がかかることから直線偏光の解消のみを評価するため、形状・粒径までのモニタリングであり、付着物の評価は行えない。

詳細な偏光状態を求める手法としてエリプソメータ (回転移相子法、偏光変調法) があるが、偏光素子を機械的、電気光学的に高い精度で制御する必要があり、また複数のスペクトルを繰り返し測定しなければならないため、小型・高速化が容易ではない。しかしながら、Oka ら (1999) によって偏光状態分布を1回のスペクトル測定のみから求めることができるチャンネル分光偏光計測が提案されている。この方式は、広帯域な白色光源に高次移相子を用いてスペクトル領域で偏光干渉させるという手法である。

超広帯域なスペクトルを有する白色光のレーザーをチャンネル分光偏光計測に応用すれば、リモートでのエリプソメトリーを実現できる。高強度フェムト秒レーザーを希ガス中に集光すると、紫外から赤外におよぶ非常に広帯域なスペクトルを持つコヒーレント白色光が生成される。これは太陽光線とは異なり、元のレーザー光の性質である指向性、干渉性、超短パルス性、偏光を有している。より詳細な情報が計測できる偏光ライダーを目指して、コヒーレント白色光を用いたリモートエリプソメトリー技術の開発を行った。

## 2. 研究の目的

1回のスペクトル測定から試料の詳細な偏光状態を決定できるチャンネル分光偏光計測を白色光ライダーに応用し、リモートでのエリプソメトリーの実現、さらには雲・エアロゾル、特に黄砂のエリプソメトリーによる解析を目的として本課題を行った。

## 3. 研究の方法

図1にチャンネル分光偏光計測法を白色光ライダーに応用した実験概略図を示す。波長 800 nm、パルス幅 100 fs、繰り返し周波数 10 Hz の高強度フェムト秒レーザーを焦点距離 5 m のレンズで 1 気圧の Kr ガスを封入し

た 9 m のガスセルに集光させ、広帯域なコヒーレント白色光に変換する。得られた白色光は曲率 10 m のミラーで再びコリメートし、大気に打ち上げられる。大気中の散乱光は直径 30 cm の望遠鏡で集められ、測定装置に導かれる。

白色光は2つの厚い移相子 R1、R2、及び検光子 A の順に透過し、それぞれの波長に応じたリターデーションを受ける。R1 の速軸と遅軸はそれぞれ試料の  $s$  軸と  $p$  軸に一致しており、R2 では両軸が  $45^\circ$  傾けられている。A の透過軸は  $s$  軸である。マルチチャンネル分光器で検出されるスペクトル  $P(\sigma)$  は、 $\sigma$  に対して滑らかに変化する1つの成分と、ほぼ正弦的に振動する3つの成分からなっており、このような振動する成分を含むスペクトルを一般にチャンネルドスペクトルと呼ぶ。 $P(\sigma)$  に含まれる各々の成分は異なる周期を持っており、さらにその振幅や位相には、 $S_0(\sigma)$ 、 $S_1(\sigma)$  や  $S_2(\sigma) + iS_3(\sigma) (= S_{23}(\sigma))$  のいずれかの情報が含まれる。 $S_0$  は信号強度、 $S_1$  は 90 度方向、 $S_2$  は 45 度方向の偏光成分、 $S_3$  は円偏光に依存するパラメータである。この  $P(\sigma)$  をスペクトル領域に拡張したフーリエ変換を用いて分離検出することで、試料反射光の分光ストークスパラメータを得ることができる。

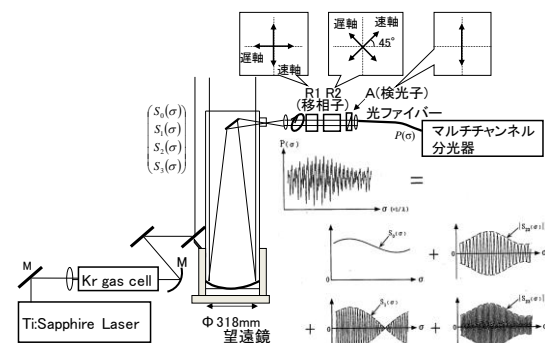


図1. 白色光ライダーによるチャンネル分光偏光計測の概略図

## 4. 研究成果

### (1) コヒーレント白色光を用いたチャンネル分光偏光計測

図2に白色光の偏光復調実験配置図を示す。試料は厚さ  $91.6 \mu\text{m}$  の水晶を用いており、結晶の光軸は R1 の遅軸から  $45^\circ$  回転させている。R1、R2 は水晶であり、厚みはそれぞれ 2、4 mm である。A はグランレーザプリズムを用いた。測定は波長分解能 1 nm の分光器で行い、100 回積算信号で評価した。また、ND フィルターを用いて白色光を減衰させた際の復調パラメータの復調精度も評価した。

図3がチャンネルドスペクトルと復調した規格化ストークスパラメータ ( $S_1/S_0$ 、 $S_2/S_0$ 、 $S_3/S_0$ ) を示す。水晶の厚みから計算できる理論曲線を点線で記述してある。それぞれの

ストークスパラメータは波長によるゆるやかな変化を再現できている。

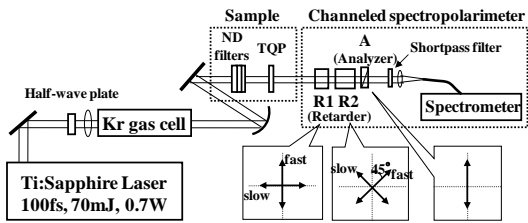


図2. 白色光の偏光復調実験配置図

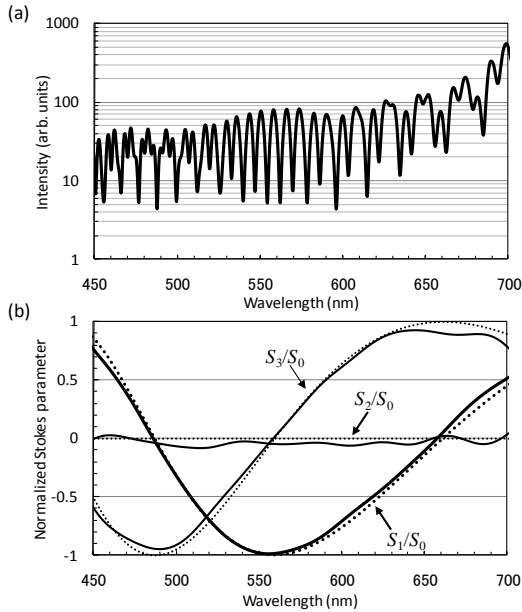


図3. 水晶（厚さ：91.6  $\mu\text{m}$ 、結晶の光軸：R1の遅軸から45°）の(a)チャネルドスペクトル、(b)復調規格化ストークスパラメータ

図4にNDフィルターを用いて白色光強度を減衰させた際の復調パラメータ  $S_1/S_0$  を示す。減衰率  $10^{-6}$  においても10%程度の誤差で偏光状態を復調できていることがわかる。ハロゲンランプ等の白色光源を利用する従来のチャネルド分光偏光計測では、吸収の大きな試料や散乱光に対しては応用できなかったが、コヒーレント白色光を利用することで観測の幅が広がるのが期待できる。

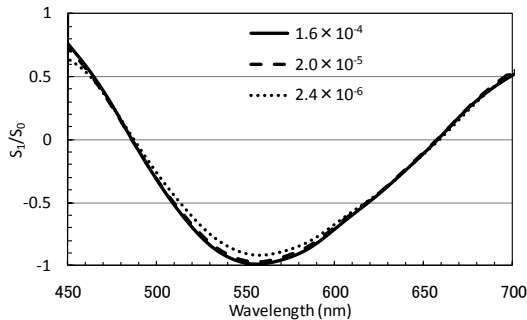


図4. 白色光の減衰率による復調パラメータ  $S_1/S_0$  の変化

(2)チャネルド分光偏光計測のリモート計測への応用

図5に20 m程度離れた位置に設置したCu板からの散乱光による偏光復調実験の配置図を示す。白色光は  $(S_1/S_0, S_2/S_0, S_3/S_0) = (1, 0, 0)$  を水平に照射し、散乱光は直径20 cmの望遠鏡で集めた。この実験ではR1、R2の厚みはそれぞれ1、2 mmであり、波長分解能2 nmの分光器で測定した。Cu板の表面は#60の紙ヤスリで表面粗さをつけており、AFMで測定した自乗平均面粗さ(RMS)は783 nmである。Cu板の角度を0~30°まで変化させ、100回積算のスペクトルを測定した。

図6にCu板のリモート測定のためのチャネルドスペクトルと復調ストークスパラメータを示す。角度0°では強度が大きい正反射成分を受光するため、15%透過するNDフィルターを挿入している。角度10、20°では、正反射成分が望遠鏡の視野に入らず散乱光成分のみになるために受光強度が減少しているが、微弱な散乱光でも偏光状態  $(S_1/S_0, S_2/S_0, S_3/S_0) = (1, 0, 0)$  の復調が行えていることがわかる。

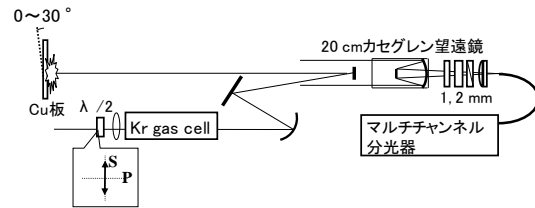


図5. Cu板のリモート測定配置図

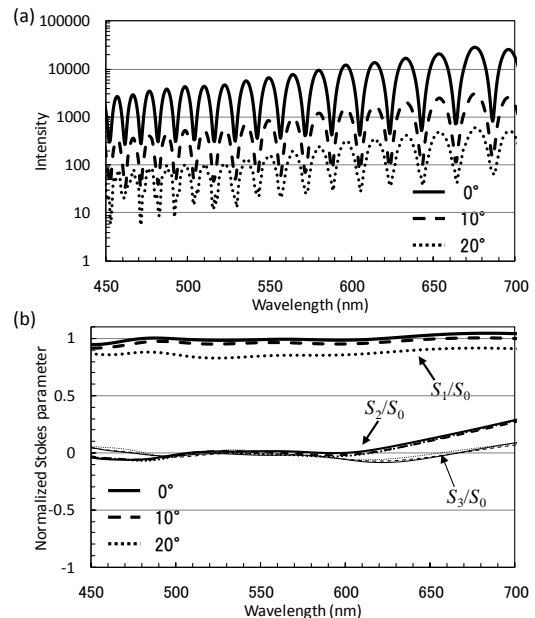


図6. Cu板のリモート測定のための(a)チャネルドスペクトル、(b)復調規格化ストークスパラメータ（白色光の偏光特性は  $(S_1/S_0, S_2/S_0, S_3/S_0) = (1, 0, 0)$ ）

(3) チャネルド分光偏光計測のライダーへの応用

図 1 に示した実験配置図でライダーへの応用を試みた。A に利用したグランレーザープリズムによって蹴られる信号を光電子増倍管で同時にモニタリングすることで、得られたスペクトル測定が、主にどの信号に由来するか評価ができるようにした。また、打ち上げるレーザーの偏光面を確認するために、打ち上げたレーザーを 2 対のミラーを用いて直接観測系に導き、チャネルドスペクトルを測定した (図 7)。白色光の偏光特性はもともと  $(S_1/S_0, S_2/S_0, S_3/S_0) = (1, 0, 0)$  であるが、望遠鏡等の光学素子によって少し偏光面が乱れている。

図 8 に高度 0.5 km にある雲のチャネルドスペクトルの観測例を示す。白色光の強度は 0.6 TW である。白色光強度の大きな 800 nm 付近では周期的なチャネルドスペクトルが観測できているが、復調に用いる可視域では地上付近の背景光しか観測できていない。白色光の強度が 800 nm に比べて可視域では 1 桁程度小さいことから、ライダーへの応用には 1 桁程度の受光信号強度の増加が必要であることがわかった。

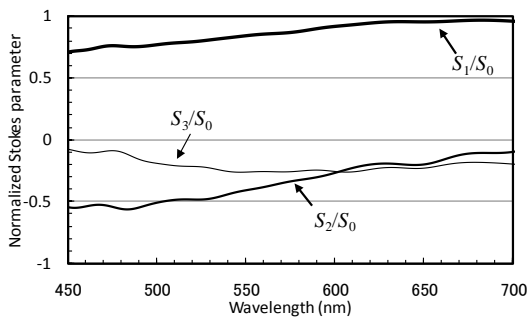


図 7. ライダー観測での白色光偏光特性

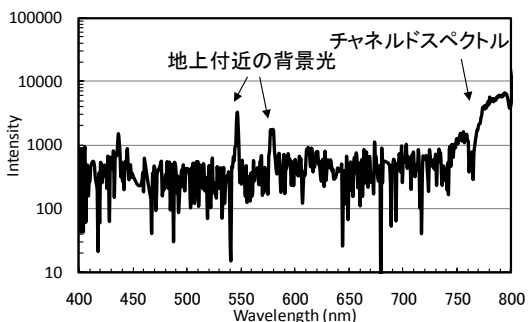


図 8. 白色光ライダーによる雲のチャネルドスペクトルの観測例

本研究では従来の偏光ライダーでは観測できなかった詳細で広帯域な偏光情報の観測が、一回のスペクトル測定のみから行う手法の提案が行えた。今回の研究期間では雲からの信号の取得には至らなかったが、白色光レーザーの出力の増加や、分光器の高感度化

等による信号取得の改善を実施することでライダーへの応用は可能になると考えている。また、本手法は Cu 板のリモート測定のような 100 m 程度の偏光観測にも有効である。この応用には数 km に及ぶ観測範囲を想定した大型の TW レーザーシステムではなく、ナノ秒パルスレーザーとフォトニック結晶ファイバーを組み合わせた小型の白色光レーザーを光源に用いるのが最適ではないかと考えている。今後は白色光を用いた応用の拡張だけでなく、新しい白色光レーザーの開発にも研究の幅を広げ、白色光ライダーの実用可能性も検討していきたい。

謝辞：本研究は北海道大学の岡和彦准教授との共同研究の成果であり、ご協力いただいた方々に感謝の意を表します。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

T. Somekawa, K. Oka, M. Fujita, Channeled Spectropolarimetry using a Coherent White Light Continuum, Optics Letters, 査読有, 15, 2010, 3811-3813.

〔学会発表〕 (計 5 件)

- ① 染川智弘、山中千博、藤田雅之、白色光偏光ライダーの開発、日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2010、2010 年 10 月 9 日、中央大学
- ② 染川智弘、岡和彦、藤田雅之、コヒーレント白色光を用いたチャネルド分光偏光計測の開発、平成 22 年度秋季第 71 回応用物理学術講演会、2010 年 9 月 14 日、長崎大学
- ③ 染川智弘、岡和彦、藤田雅之、コヒーレント白色光を用いたチャネルド分光偏光計測、レーザー学会学術講演会第 30 回年次大会、2010 年 2 月 2 日、千里ライフサイエンスセンター
- ④ 染川智弘、岡和彦、藤田雅之、コヒーレント白色光を用いたチャネルド分光偏光計測、平成 21 年度秋季第 70 回応用物理学術講演会、2009 年 9 月 10 日、富山大学
- ⑤ 染川智弘、岡和彦、藤田雅之、コヒーレント白色光を用いたチャネルド分光偏光計測、第 27 回レーザセンシングシンポジウム、2009 年 9 月 4 日、ホテルエビナール那須

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ilt.or.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

染川 智弘 (SOMEKAWA TOSHIHIRO)

財団法人レーザー技術総合研究所

レーザー加工計測研究チーム 研究員

研究者番号：00508442