

5 研究活動

5.1 ドームレス太陽望遠鏡共同利用報告

太陽多層共役補償光学系と画像改善技術の開発

我々は飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡 (DST) 用の補償光学系 (AO) の開発を進めており [1]、2013 年度には、2013 年 5-6 月、9 月の計 2 回の観測を実施した。今年度は前年度に引き続き、多層共役 AO と画像改善手法の開発を重点的に行った。

通常の AO は補償が有効な視野が狭いため、広い視野での補償を可能にする多層共役 (MC)AO の開発が重要である。前年度に実施した太陽 SCIDAR での観測 [2] によって、飛騨天文台上空 3 km 付近に強いゆらぎ層が存在していたことがわかったので、第 2 の可変形鏡を上空 3 km に対応する位置に置くように光学系を設計した。また、5 月の観測時に実施した MCAO センシングの予備実験において、像を取得する前に瞳径を制限することで、より安定したセンシングが可能であることが判明した。この結果に基づいてセンサ系の設計を行った。9 月には、開発した MCAO 装置を飛騨天文台垂直分光器のテーブル上に設置し、AO 通過後のビームを MCAO 系に導入して実験を行った。観測した太陽像 (図 1) において、矢印で示す黒点間の距離変動の偏差をプロットしたものが図 2 である。AO + MCAO が動作しているときに最も小さくなっており、AO のみ、両方なし、となるに従って変動が大きくなっていることが分かる。2F 常設 AO の設置後、1F により本格的な MCAO 系を構築しさらに実験を進める予定である。

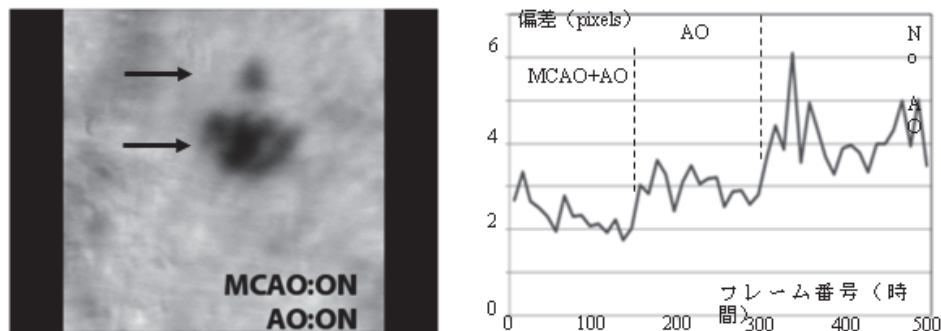


図 1(左): MCAO 実験で用いた太陽像。MCAO が有効に動作するときは像の伸縮が抑制される。図 2(右): 黒点間距離の変動 (偏差) をプロットしたもの。MCAO と AO を両方動作させているときに最も変動が抑えられている。

AO を通して観測された像をさらに改善することを目的として、2 台の波面センサを利用する画像処理手法を開発も前年度から引き続き行った。波面センサ 1 台は従来通り AO を駆動するための波面センサとして用い、もう 1 台は太陽像の取得時に波面情報を保存しておくために利用する。このとき、太陽像とセンサ情報の取得は外部トリガによって同時性を保証する。得られた波面情報からその瞬間の PSF を計算し、これを用いて太陽像をデコンボリューションすることで、画像の改善を実現するものである。今年度は、第 2 の波面センサのマイクロレンズアレイの数を 14×14 と増やし、より高精度な PSF 推定を実

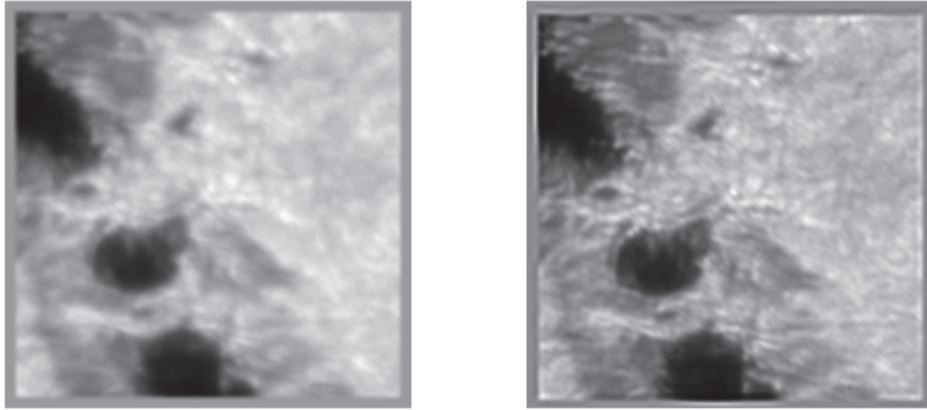


図 3(左): AOを通して観測された太陽観測像。波面計測のターゲットは中央左の黒点。図 4(右): 図 3 の画像に画像回復処理を適用したもの。細かな構造がより鮮明になっている。

施した。さらに、デコンボリューション法として Lucy-Richardson (LR) 法を新たに実装した。図 3 は AO を通して観測された太陽像、図 4 は LR 法によって得られた改善された画像である。LR 法のループは 20 回である。センシングのターゲットである中央左寄りの黒点付近ではより詳細な構造が見えているのが確認できる。ただし、そこから離れるに従って画像改善の効果が薄いことがわかる。これは、推定した PSF の有効範囲が大気ゆらぎの isoplanatic パッチ領域で決まるためである。

< 参考文献 >

- [1] N. Miura, et al. 2012, Proc. of SPIE, 8447, 8447-162.
- [2] N. Miura, et al. 2013, MNRAS, 434, 1205-1219.

(三浦則明、大石歩、茂垣光、青木章太郎 (北見工大) 記)

高速回転波長板ポラリメーターを用いた彩層吸収線の偏光測光

太陽活動を研究するには、その源泉である磁場を測定する、すなわち磁場による偏光を測定する必要がある。特に最近では、光球より上層の磁場の情報が得られる彩層吸収線の偏光測定が重視されている。光球吸収線に比べて格段に偏光度の小さい彩層吸収線の測定によって意味のあるデータを得るには、偏光測定において 10^{-4} レベルの感度を確保しなければならない。このような高度な測定においてもっとも大きな誤差要因は、地上観測の場合はシーイングによって生ずる偽偏光である。このシーイングによる影響を軽減するひとつの方法が、偏光変調を高速化することで変調をかけて撮像した各画像間のシーイングによる位置ずれや歪みによる差を減らす、というものである。我々は高速回転波長板ポラリメーターを試作し、2010年度からドームレス望遠鏡の垂直分光器に取り付けた実験を行っている。装置が安定して稼働するようになってからは実際に活動領域の観測を行い、その偏光データの解析を行おうとしているところである。天候や装置不調などの影響でなかなかデータの蓄積が進まないが、2013年は12月に活動領域のスキャン数回を行うことができ(図)、 $H\alpha \cdot Fe I 6569$ と $Na D1$ の両波長域でのデータを得ることができた。

現在偏光測光結果について詳しくは現在解析中であるが、今後さらに観測を続け、彩層吸収線について十分な偏光観測データを得たい。なお、高速回転波長板ポラリメーターは、ここ数年の飛騨での開発実績ももとにして、国立天文台三鷹のフレア望遠鏡でも使用を始めた。

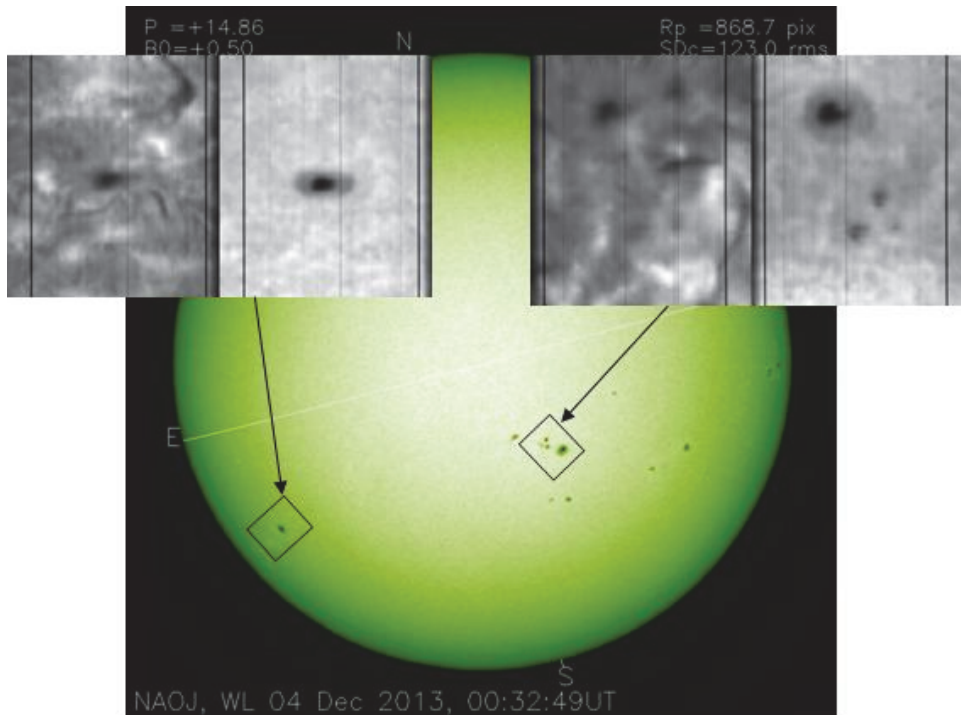


図: 2013年12月4日に飛騨での観測で得られた活動領域の $H\alpha \cdot Fe I 6569$ スペクトロヘリオグラムを、三鷹黒点望遠鏡の全面白色光画像とともに示した。黒い縦筋はヘアラインである。

(花岡庸一郎(国立天文台) 記)

太陽 2次元面分光観測装置による活動領域の分光観測

マイクロレンズアレイを用いた太陽用2次元面分光装置の開発を飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡にて行っている。太陽で起こるジェット現象やフレアを始めとするダイナミック現象を的確に捉え、現象の正確な物理量を導出するためには、2次元同時分光を行う必要がある。面分光を実現する方法としては、マイクロレンズを用いるもの、光ファイバー束、スライサー鏡を用いる3つの手法が代表的である。いずれも一長一短であるが、マイクロレンズの手法は、既存の望遠鏡・分光器を利用して簡単に面分光観測が実現できる点で利点がある。2013年上記の期間、ドームレス太陽望遠鏡水平分光器でマイクロレンズアレイを用いた面分光観測を、NOAA活動領域11884の黒点領域で行った。観測は彩層ダイナミック現象検出に有用な水素のスペクトル線H α 線(656.3 nm)波長域で視野約10秒角、時間分解能約3秒であった(下表に観測パラメータ)。観測データが得られたのは、10月30日、31日、11月1日の3日間であったが、この間、めばしい活動現象は起きなかったが、シーイングの良い時には黒点の特徴を示す貴重なスペクトルを得ることができた。図1右に示すように、黒点は連続光で暗いがH α 線では暗くない(図では輝線のように見える)ことを端的に表している。

表1. マイクロレンズアレイ面分光装置のパラメータ。

マイクロレンズアレイ	1.3mm 四角ピッチ, 焦点距離 72.8mm, 30x30 アレイ
空間サンプリング	0.5 秒角
視野 (23x23 アレイ)	11x11 秒角 ²
波長サンプリング、波長幅	0.03Å/ピクセル, 10Å
露出時間	2秒 (low grating efficiency)

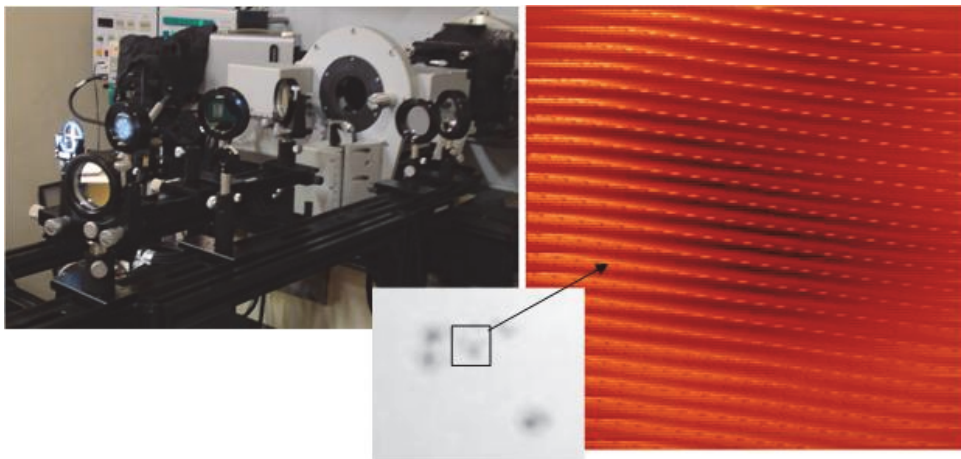


図1. マイクロレンズアレイ面分光装置の前光学系セットアップ(左)、NOAA 11884の観測視野(中)、黒点領域のH α 面分光データ(太陽面中心データを差し引いた)(右)。視野に示すものとは左右反転の関係。

(末松芳法(国立天文台)、上野悟 記)

飛騨天文台 DST 及び「ひので」可視光望遠鏡を用いたエラーマンボムの多波長同時分光観測

飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡 (DST) の水平分光器では、多波長同時分光観測が可能であり、複数のラインを選択することにより太陽活動現象の高さ方向の構造の解明に繋がることが期待される。一方で、近年ではひのでや IRIS による衛星からの高空間分解能観測が実現しており、これまで地上観測では継続的な観測が難しかった小規模な活動現象を捉えることが容易となっている。本研究ではこれら地上観測と衛星観測双方の利点を活かして、太陽表面上の小規模増光現象であるエラーマンボムの共同観測を行った。エラーマンボムは観測的には $H\alpha$ 線のウイング部分で増光を示すという特徴的なプロファイルを持ち、彩層下部での磁気リコネクションによるエネルギー解放によるものと考えられている。今回我々はエラーマンボムにおける彩層中のエネルギー輸送を解明するため、DST 水平分光器による多波長同時分光観測と同時にひので可視光望遠鏡 (SOT) を用いたエラーマンボムの高空間分解能観測を行った。本観測は 2013 年 7 月 29 日から 8 月 2 日及び 8 月 16 日から 20 日にかけて行い、ひので SOT の Ca II H 線フィルタグラム、DST 水平分光器の $H\alpha$ 線、Ca II K 線、Ca IR 線スペクトロヘリオグラムのデータを取得した。DST 水平分光器により得られたデータを解析したところ、2013 年 8 月 18 日の 06:02UT–06:45UT に NOAA 11818 の近傍で、複数のエラーマンボムが観測された (図 1)。ひので SOT の観測データを確認したところ、同時刻に増光現象が見られた。これらの観測データからプロファイルの時間変化について解析を行った。今後はさらに IRIS のデータとの比較を行い、彩層から遷移層におけるエラーマンボム中のエネルギー輸送の解明につなげていく予定である。

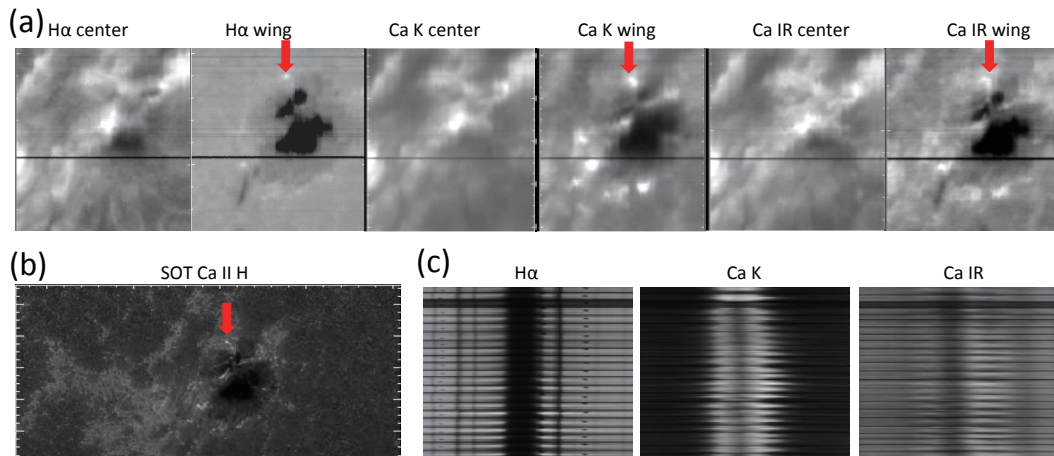


図 1:(a)DST 水平分光器による $H\alpha$ 線、Ca K 線、Ca IR 線のスペクトロヘリオグラム。エラーマンボムの位置を赤矢印で示してある。(b) 同時刻のひので SOT による Ca II H フィルタグラム画像。(c) エラーマンボムの各スペクトルの時間変化。

Reference: Ellerman, F. 1917, ApJ, 46, 298

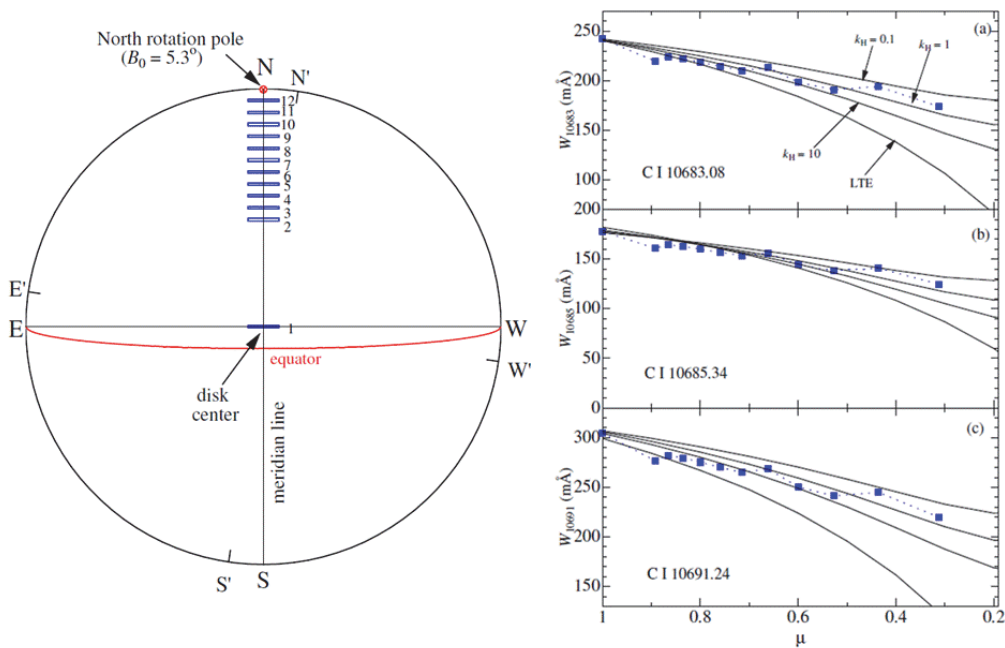
(加藤 友梨 (明星大学)、大辻 賢一 (国立天文台) 記)

中性炭素線の太陽面中心-周縁強度変化と中性水素衝突係数の推定

最近竹田らがすばる望遠鏡の IRCS を用いて行った近赤外の $1.07\mu\text{m}$ の C I 線に基づく金属欠乏星の炭素組成解析 (文献 [1]) では $[\text{Fe}/\text{H}] < -2$ の非常に金属欠乏領域において CH から出した組成と C I から出した組成の系統的な食い違いが見られた。この食い違いの説明として一つの可能性は NLTE 効果が大きい C I 線の NLTE 補正が正しくないことである。というのも FGK 型の晩期型星では中性水素原子による非弾性衝突効果がよくわかっていないので衝突遷移レートの不確実性が大きく、これが NLTE 計算の信頼性を損ねているからである。

この中性水素衝突係数 $C(H)$ には古典的考察に基づく公式もあるが単なるオーダーの目安程度のものにすぎないので、そこで $C(H) \equiv kHC(H)_{\text{classical}}$ と書いてこの補正因子で対応するのが一般的であり、結局 kH の値を知ることが本質的になる。([1] においては $kH = 1$ を用いた。) そこで我々は太陽を用いる経験的なアプローチでこの問題に取り組むことにした。つまり太陽面上の異なる $\mu (= \cos\theta)$ の点では形成層が異なることを利用して、複数の μ における近赤外 $1.07\mu\text{m}$ C I 線強度を kH を色々変えた理論計算値と比較し、 kH の値に関する情報を得ることを試みたのである。

観測は 2013 年 7 月 26 日に京都大学飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡の水平分光器を用いて行った。図 (左) に示すように太陽面上の μ の異なる 12 点の位置で $1.069\mu\text{m}$ 領域で波長分解能 19 万のスペクトルを得た。そして中性炭素線三本の等価幅 $W'(\mu)$ を各位置で測定した。円盤中心でのスペクトルを NSO スペクトルアトラス (文献 [2]) と比較したところ散乱光の影響で約 25% ほどスペクトル線強度が弱く出ていたので、みかけの $W'(\mu)$ に対しこの効果を補正して真の等価幅 $W_{\text{obs}}(\mu)$ を求めた。



次に各々の線について ATLAS9 太陽大気モデル ([3]) を基に、 $kH = 0.1, 1, 10$ の三通りの場合で Non-LTE 計算を行い、理論的な $W_{th}(\mu)$ を計算した。

こうして得られた観測値 W_{obs} と理論値 W_{th} の比較を図(右)に示す(なお LTE は $kH = \infty$ に対応するがこの場合も参考のために図示している)。この図からは(ちらばりがあるので kH の値を特定することは難しいが)「古典的な取り扱いの $kH = 1$ で特に悪くない」ことが言える。従って最初に述べた食い違いは non-LTE 計算が不適當だったための C I からの組成の系統誤差にはできない。分子線は温度に非常に敏感なのでむしろ大気構造の不確定性が CH バンドから出した C 組成の方に系統誤差を生じたのではないかと推察される。本研究の詳細については文献 [4] を参照されたい。

(文献)

- [1] Takeda & Takada-Hidai 2013, PASJ, 65, 65
- [2] <ftp.hs.uni-hamburg.de/pub/outgoing/FTS-Atlas>
- [3] Kurucz 1993, Kurucz CD-ROM No.13
- [4] Takeda & UeNo 2014, PASJ, 66, 32

(竹田洋一 (国立天文台) 記)

太陽磁場偏光計測への時間相関イメージセンサの適用: ベクトル磁場分布の高精度同時計測を目指して

安藤 繁¹⁾, 花岡 庸一郎²⁾, 櫻井 隆²⁾

¹⁾ 東京大学大学院情報理工学系研究科, ²⁾ 国立天文台

I. はじめに

ゼーマン効果で太陽光のスペクトルの吸収線上に生じた偏光を観測することで、太陽表面の磁場の分布を観測することができる。従来は、Stenflo, Povel, Sprigらにより開発されたロックイン CCD (ZIMPOL) をイメージセンサに用いる方法が実用化されていた。一方で、これらとほぼ同時期から視覚センサへの応用に向けて開発された時間相関イメージセンサにおいては、1) 画素ごとに直交相関検出が可能, 2) 正弦波を参照信号として用いたアナログ相関検出により高調波や異周波入力による誤差が入らない, 3) 画素上での電荷の時間積分による読み出し雑音や誤差の減少, 4) 相関の Bayer 配列により 3 つの周波数での同時直交相関検出が可能, などの利点を有し、偏光観測の簡易化や実時間化にとどまらず、その高度化にも貢献できる可能性がある。このような観点から、飛騨天文台のドームレス太陽望遠鏡上で観測システムを構築し、2013 年 9 月に観測実験を試みた。

II. 太陽磁場の実時間偏光映像法

A. 回転補償子法

測定時に入射光に変調を加える要素として補償子 (1/4 波長板) を用いる方法が回転補償子法である。入射光の経路に光軸まわりに回転可能な補償子を挿入し、さらにその出射光を向きを固定した偏光子に通した後、イメージセンサにより透過光の強度を画像として観測する。

入射光を E_x, E_y , 出射光を E'_x, E'_y と書くと、補償子を回転速度 ω で定常回転させた場合の出射光は、

$$\begin{bmatrix} E'_x \\ E'_y \end{bmatrix} = \frac{1+j}{2} \begin{bmatrix} \cos 2\omega t & \sin 2\omega t \\ \sin 2\omega t & -\cos 2\omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} + \frac{1-j}{2} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

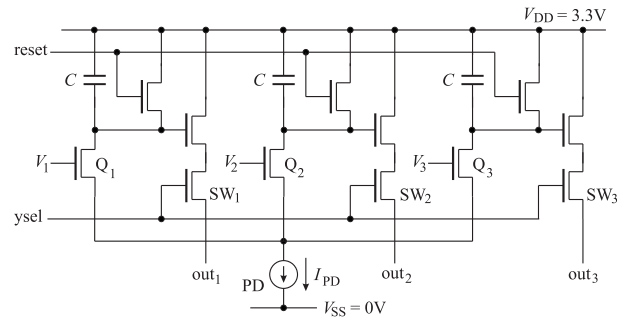
と表される (j は虚数単位)。よって、回転補償子の後に偏光板を角度 0 度で置くと、その出射光の強度は

$$\begin{aligned} |E'_x|^2 &= \left| \frac{1+j}{2} (E_x \cos 2\omega t + E_y \sin 2\omega t) + \frac{1-j}{2} E_x \right|^2 \\ &= \frac{1}{4} (S_1 \cos 4\omega t + S_2 \sin 4\omega t \\ &\quad + 2S_3 \sin 2\omega t + 2S_0 + S_1) \end{aligned} \quad (2)$$

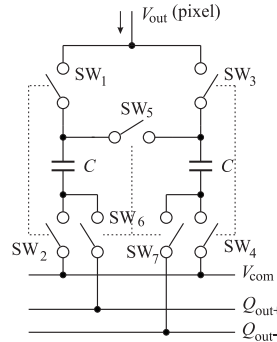
となる。すなわち、周波数 4ω の振幅と位相に直線偏光に関するストークスパラメータ $S_1, S_2 (Q, U)$ が、 2ω

の成分の振幅に $S_3 (V)$ (右回り円偏光と左回り円偏光の差) が、直流分に $2S_0 + S_1 (I + 2U)$ が符号化されることが分かる。

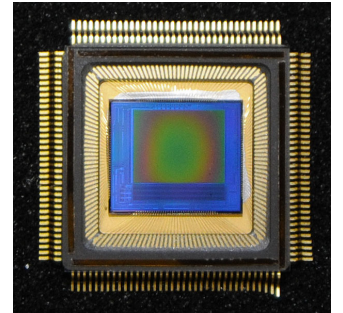
通常のリニア補償子法では、補償子を数段階の回転角度に固定して撮像し、読み出し後の画像解析により偏光パラメータの分布に変換する。しかし、一連の撮像に数フレーム分以上の時間を要し、この間に太陽磁場の偏光観測の際に大きな障害となる大気ゆらぎの影響を受けやすい。一連の撮像間に生じた条件変化に由来する矛盾成分は、変換の後に大きな誤差をもたらす。時間相関イメージセンサへの期待はこの障害の解決と格段の高速化・実時間化にある。



(a) 画素回路 (電荷-電圧変換と電荷リセット回路に注意)



(b) CDS 回路



(c) 640 × 512 画素チップ

Fig. 1. CMOS 能動読み出し型三相時間相関イメージセンサの画素回路と 640 × 512 画素チップ写真。

B. 時間相関イメージセンサ [3]

時間相関イメージセンサ (CIS) は、Fig.1 に示すように、画素ごとに電荷を蓄積するコンデンサが 3 個あり、それらに時々刻々発生する光キャリアを分流して蓄える。分流比は参照信号によって高速・動的に制御される。参照信号を正弦波とし、蓄積された電荷を Q_1, Q_2, Q_3

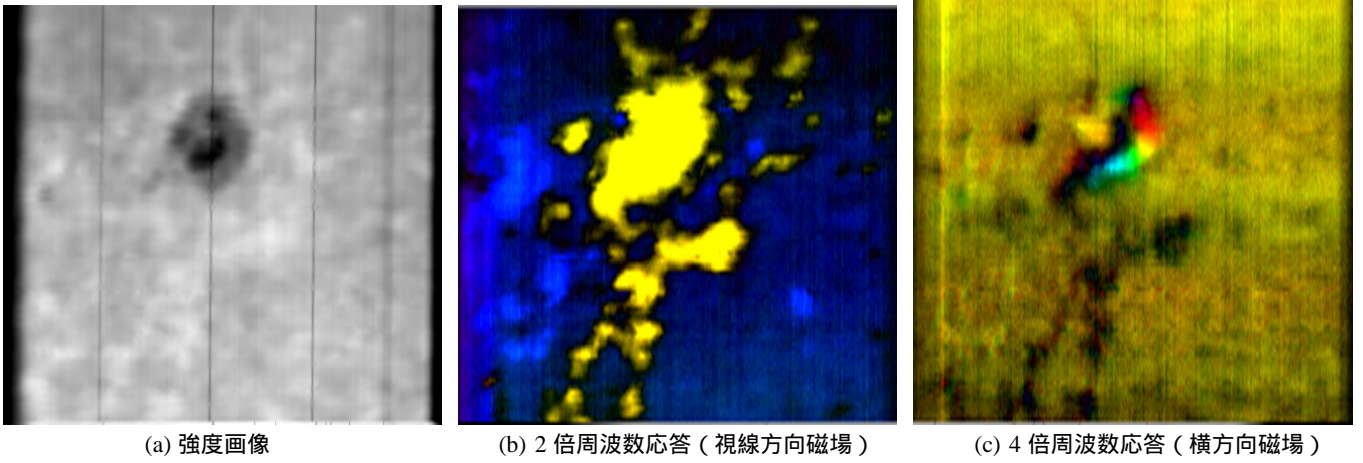
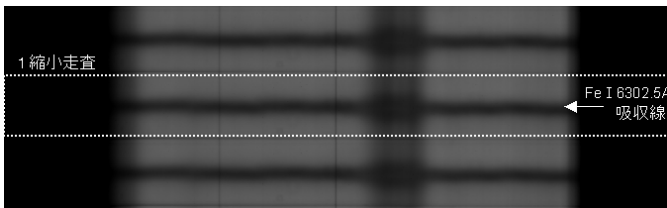
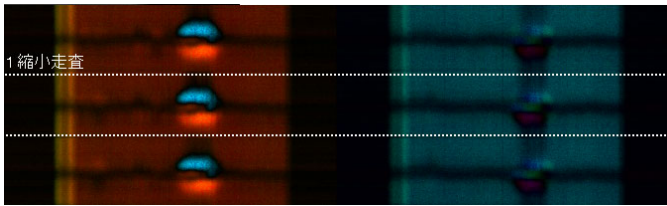


Fig. 3. 飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡による実験結果の一例。(a) は強度画像で、(b) は 2 倍周波数 (視線方向磁場)、(c) は 4 倍周波数 (横方向磁場) の相関画像をカラーで表したものの。像のぼけは大気揺らぎによるもので、復調への影響は排除できているが、結果の画像の解像度は劣化している。



(a) 強度画像



(b) 2 倍周波数相関画像 (左半分) と 4 倍周波数相関画像 (右半分)

Fig. 2. 1280×1024 画素時間相関イメージセンサによる各ステップでの撮像例。連続する 3 枚の縮小走査画像 (横長のブロック) を縦に並べたもの。ブロック中央の黒い横線が Fe I (6302.5 \AA) 吸収線を示す。吸収線の上下にカラーで明るく表れているように、各縮小走査画像で既に偏光成分の復調が行われている。

とすると、読み出し後に以下の行列を乗じると、

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ 0 & -1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix} = \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \begin{bmatrix} 1 \\ \cos(n\Delta\omega t) \\ -\sin(n\Delta\omega t) \end{bmatrix} dt \equiv \begin{bmatrix} g_0 \\ \Re g_n \\ \Im g_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

のように周波数 0 と周波数 $n\Delta\omega = 2\pi n/T$ の有限フーリエ変換 (周期 T のフーリエ係数) が得られる。

C. 補償子の同期回転駆動と参照信号の生成

今回、最大回転数 160rps, 中空径 $26\text{mm}\phi$ の高速中空モータを新たに開発し、その中空軸内に補償子を固

定した。今回の装置ではモータの回転周波数を最低でも 30Hz (30rps) 以上として大気揺らぎの排除能力を高め、イメージセンサ側で入射光量に応じてフレーム周波数を 3.75Hz から 15Hz に設定し、参照信号として、その 8 倍と 16 倍の組やそれ以上の周波数の組の三相正弦波を供給するようにした。

III. 実験結果

Fig.2 は各走査ステップでの撮像例を示す。Fe I (6302.5 \AA) の吸収線のみを時間相関カメラの縮小走査機能で切り出し、これを通常の 1 フレームとするように 1 ステップあたり 16 枚の撮像を行う。各縮小走査画像自体でも偏光成分の復調は完了しているが、さらに 16 枚の加算平均を行うことで SN 比を向上させる。Fig.3(a),(b),(c) は太陽黒点付近における撮像結果の一例であり、まだまだ再構成処理も不十分な初期段階の結果ではあるが、黒点の外でも偏光信号が生じていることが捉えられている。

IV. 謝辞

時間相関イメージセンサ開発にご協力いただいた静岡大学川人祥二教授、実験にご協力いただいた飛騨天文台の方々へ深く感謝いたします。

REFERENCES

- [1] 安藤, 花岡, 櫻井, “時間相関イメージセンサによる太陽磁場の偏光観測の原理と実験,” 日本天文学会秋期年会, 大分, 2012.
- [2] 安藤, 花岡, 櫻井, “太陽磁場の偏光計測への時間相関イメージセンサの適用,” 電気学会計測研究会, 甲府, 2013.
- [3] S. Ando and A. Kimachi, “Correlation image sensor: Two-dimensional matched detection of amplitude-modulated light,” IEEE Trans. Electron Devices, vol. 50, 2059-2066, 2003.
- [4] 安藤, 来海, “時間相関イメージングとその応用,” 電気学会センサマイクロマシン部門誌, vol.129, no.5, pp.129-137, 2009.
- [5] 来海, 安藤, “時間相関イメージセンサ - 高度な実時間パターン計測を実現する画像センサ -,” 計測と制御, vol.47, no.1, pp.10-17, 2008.