

# 1 波長板の干渉パターン(リップル)の調査

## 1.1 背景

Donati et al.(1999)によれば、貼り合わせ型の波長板を高波長分解能 ( $R > 5000$ ) の偏光分光観測に用いた場合、貼り合わせ境界面内での多重反射により生じた干渉パターン(以下、リップル)が得られたスペクトルに生じることが報告されている。また、このリップルは安定せず(気温によって?) 時間変動を起こす事も同時に報告されており、高精度の偏光測定を行なう上では非常に問題となってくる。

しかしながら、一方でリップルの原因および変動幅等の定量的な評価がきちんとなされているわけではない。そこで、新偏光器で使用予定のスーパーアクロマチック  $\lambda/2$  波長板(6枚貼り合わせ、以下SU1/2波長板)を用いて、高波長分解域でリップルが生じることを確認の上、その原因究明と対策法の模索のためにそれらの定量評価を行なうことにした。以下はその結果報告である。

## 1.2 実験 1 – 波長板の大まかな波長分解能での透過率の測定

### 1.2.1 概要

リップルの大まかな特性を掴むために、三鷹オプトショップにある分光光度計 UV3200PC(波長分解能  $\sim 0.1$  nm)を用いてSU1/2波長板の透過率の測定を行なう。本来ならば波長に対して滑らかであるはずの透過率の周期的変動を捉えることによって、干渉によって生じたリップルを認識する。また、2枚貼り合わせのアクロマチック波長板およびクロマチック  $\lambda/4$  波長板についても同様の実験を行なう。

### 1.2.2 準備するもの

- UV3200PC (分光光度計)
- SU1/2 波長板 (20 mm $\phi$ )
- アクロマチック 1/2 波長板 (2 結晶、10mm  $\phi$ )
- クロマチック  $\lambda/4$  波長板
- ポラライザー
- フロッピー 3.5 インチ

### 1.2.3 手順

1. UV3200PC の条件設定。

- 測光値モード 透過率
- 測定範囲 波長板の角度によって任意に調整
- 走査開始波長 400 nm、走査終了波長 700 nm
- 波長送り精度 超低速 (50 nm/min)
- スリット幅 最小 (0.1 nm に相当)
- サンプリング間隔 0.05 nm

2. ポラライザーの設置。サンプル光とリファレンス光の入射口に、水平方向の偏光のみが透過するように貼付ける (この軸を  $0^{\circ}$  の光学軸とする) <sup>1</sup>。
3. SU1/2 波長板、アクロマチック  $\lambda/2$  および  $\lambda/4$  波長板について透過率を測定。 $\lambda/2$  波長板については、 $90^{\circ}$ 、 $67.5^{\circ}$ 、 $45^{\circ}$ 、 $22.5^{\circ}$  の方位角で測定を行なう。 $\lambda/4$  波長板については  $0^{\circ}$ 、 $45^{\circ}$ 、 $90^{\circ}$  の方位角で行なう。
4. 必要があれば (直前の結果を見て判断の上)、サンプル光とリファレンス光の出射口にポラライザーを挿入し、波長板透過後の常光/異常光の透過率を測定する。
5. 終了

#### 1.2.4 結果

実験は、三鷹のオプトショップにて 1999 年 9 月 22-24 日に行なわれた。実験者は池田及び川端。室温は 25-26 度、湿度は 47%であった。

- SU1/2 波長板とアクロマチック波長板の比較  
SU1/2 波長板とアクロマチック波長板両方に完全直線偏光を入射し、その透過率を調査した (図 1.1a)。波長域は 500-550nm、波長板の方位角は、 $0.0^{\circ}$ 、 $22.5^{\circ}$ 、 $45.0^{\circ}$ 、 $67.5^{\circ}$  でそれぞれ測定を行なった。明らかに、SU1/2 波長板でリップルが生じているのが分かる。
- リップルの方位角依存性  
リップルの振幅は、peak-to-peak で 3%にも及ぶ場所がある。その振幅は波長板の方位角によって変動する (図 1.1 b)。入射光の直線偏光に対し方位角  $22.5^{\circ}$  もしくは  $90.0^{\circ}$  の時は振幅は小さく ( $\sim 1\%$ )、 $67.5^{\circ}$  および  $45.0^{\circ}$  の時は振幅は大きい。しかしながら、この振幅の変動は後述する時間変動による可能性も否定できず、慎重に判断する必要がある。各方位角におけるリップルの周期は、互いに同期している (周期はおよそ 0.4nm)。
- リップルの波長依存性  
400-700nm の透過率スペクトルを 5nm ずつ切り取り、その中での周期を IRAF の PDM コードを用いて推定し、それらを波長に対してプロットした (図 2)。リップルの周期は、およそ波長に比例していることが分かる。これは、リップルの原因が干渉現象になんらかの関連がある (Donati et al. 1999) 可能性を示唆するものである。また、波長帯によってはプロット点が存在しない領域があるが、これはリップルがほとんど見られず周期を推定できなかったためである。リップルの振幅は、およそ 0.5nm の周期に加え、うなりのような長周期成分 ( $P \sim 100$  nm) も存在するようである。長周期成分は AAT の RGO 偏光分光装置にも見られている (Harries & Howarth 1996)。
- 波長板透過後の常光/異常光  
波長板透過後の完全直線偏光を更に常光/異常光に分離してそれぞれのリップルの振るまいを調査した (図 3)。ポラライザーによって光量が減ることによる S/N の低下とおそらく時間変動ため、はっきりとしたリップルを認めることが難しい。しかしながら、リップルを確認できる波長帯については常光と異常光でおおよそリップルは同期しているように見える。

<sup>1</sup> ポラライザーは、その軸がサンプル光とリファレンス光でずれないように、両光線を覆えるほど大きなものを使用する。

### 1.2.5 考察とまとめ

我々の SU1/2 波長板においても、Harries & Howarth(1996) や Donati et al.(1999) に報告されているリップルが認められた。それらは、干渉現象が関連している可能性がある点についてはアクロマチック  $\lambda/4$  波長板に見られたものと類似していたが周期が全く異なっていた ( $\lambda/4$  波長板にみられた周期は  $\sim 10$  nm 程度)。しかもそのリップルは、透過率にして 3% にも達しており、 $\Delta P < 0.1\%$  の偏光測定精度を達成するには非常に大きな障害となってくる。現時点ではハードの面からリップルを消去することは時間と予算の面から難しいだろう。したがって、以下ではソフトの面からリップルを対処することが可能かについて考察することとする。

リップルをキャリブレーション可能にするために以下のような条件が全て揃うことが必要であると考える。

- 常光／異常光でのリップルの同期性
- 小さすぎないリップルの周期 (1 周期が 12 pix 以上)
- リップルの時間安定性

最初の二項目については今回の実験で、クリアしていることが確かめられた。問題は、リップルの時間安定性である。今回の実験でも、波長板とポラライザー同じセットにした場合でも、リップルの振幅強度が変化したように感じられた。この振舞と原因追求については、引続きモニター観測を行なっていきたいと考えている。

10 月下旬まで実験を重ね、それら結果を見てモジュラーとして SU1/2 波長板を使用するかアクロマチック波長板 (赤用と青用) を使用するか決定したい。

## 1.3 実験 2 – リップルの時間変動の調査

### 1.3.1 概要

実験 1 において、おおまかな 1/2SU 波長板に生じるリップルの特徴を掴むことができた。その結果、時間による変動がなければ使用に絶え得るだろうという一応の結論を得た。したがって、本実験ではリップルの時間変動とその原因を探るべくリップルのモニター観測を行った。

### 1.3.2 準備するもの

実験 1 に同じ。

### 1.3.3 手順

1. UV3200PC の条件設定。
  - 測光値モード 透過率
  - 測定範囲 波長板の角度によって任意に調整
  - 走査開始波長 400 nm、走査終了波長 700 nm
  - 波長送り精度 超低速 (50 nm/min)
  - スリット幅 最小 (0.1 nm に相当)
  - サンプリング間隔 0.05 nm

2. ポラライザーの設置。サンプル光とリファレンス光の入射口に、水平方向の偏光のみが透過するように貼付ける (この軸を  $0.0^\circ$  の光学軸とする)
3. SU1/2 波長板の方位角を  $67.5^\circ$  もしくは  $22.5^\circ$  にして透過率を測定。 $67.5^\circ$  は、以前非常に大きなリップルが観測された方位角である。
4. 以上を日毎もしくは時間毎に行いリップルの変動をモニターしてゆく。

#### 1.3.4 結果と考察

実験は、三鷹のオプトショップにて9月27日-10月6日および10月12,13日に行われた。実験者は池田および川端。実験を通して、 $\pm 3^\circ\text{C}$  を超える大きな室内の温度変化はなかったと考えられる。

- リップルの日変動

図4に7日間のリップルモニター観測の結果を示す。410-425nm付近では、S/Nが悪いせいかはっきりとリップルを認めることができないが、それより長い波長域では非常に美しい？リップルが見られる。おおまかに見て、周期のパターンはどの日のものも一致しており、周期変動はないように見える。図5にPDMコードで求めた各波長のリップル周期を時間系列に対してプロットしてあるが、精度の範囲内においては、ほとんど変動はない。しかしながら、600-603nm領域と677-680nm領域の微妙な周期変動の様子が非常に良く相関しており、周期にして $0.05\text{nm}$  ( $=0.5\text{ \AA}$ ) 以下の変動はリアルである可能性がある。周期とは異なり、リップルの振幅は日毎に大きく変動しているように見える (図4)。

- リップルの時間変動

およそ1時間おきに、モニター観測を行った結果を図6に示す。周期変動の程度は、日変化を追ったときと同程度かそれ以下である (図4, 図5)。日変化では、異なる波長域同士で変動の様子に相関が見られたが、時間変化ではそれは認められなかった。振幅 (平均値に対する標準偏差) の変動を追ったのが図7である。日単位では大きくランダムに振幅が変動しているように見えるが、時間単位では変動はほとんど見られない。時間変動を追った実験では、全ての実験を通して試料 (SU1/2 波長板) に全く触れていなかった。したがって、周期/振幅の日変動は試料の (方位角や光軸に対する試料の傾き等による) 位置再現性が第一義的な原因であったと考えられる。

- 温度変化による変動

次項参照。結果のみを述べれば、温度変化によるリップルの変動はありえない。

実験を通して見られたリップルの周期/振幅の変動の主たるものは、試料を設置を際の位置再現性であったと考えられる。これは、実際の観測においては問題にならないであろう。それ以外に周期/振幅を変化させる原因があるかということについては、変動の特性も含めて現在の装置では精度的に追うことは難しいと考えられる。ただし、温度変化に伴う素子膨張が原因となり得ないことは確かである (1-4節参照)。

#### 1.3.5 リップルの時間変動調査の追実験

前節までの結果で、リップルの周期及び振幅は時間系列に対しての有意な変動はないことは確かめられた。しかしながら、リップルの波長に対するパターンに関してはおおそ同期はしているものの、図6をよくみると少しばかりずれを生じているものも見受けられなくはない。当初は、これは実験装置の波長決定精度 ( $0.1\text{ nm}$ ) が原因であろうと考えていたが、それよりも大きな波長方向

へのずれもあるようにも思える。それら同期性についての曖昧な点を明らかにするために、追実験を行った。実施日は、10/22 および 10/23。また、今回は試料室内に温湿計を設置し、温度/湿度のモニター観測も行った。波長帯は、これまでの実験で立派なリップルが生じることが認められている 677-680 nm 帯を選んだ。

まず、最初に約 800 分におよぶモニター観測を以下のような手順で行った。

1. 温度/湿度の記録。
2. 透過率の測定 (3 度連続しておこなう)。
3. 1 時間程のインターバルを置く。
4. (1)-(3) を繰り返す。

周期及び振幅の有意な時間変動がなかったことを確認した後、時間系列で最初に測定したものに対する各時間系列の reduced  $\chi^2$  の値をプロットしたのが図 8(上) である。 $\chi^2$  の値のずれがすなわち、同期性からのずれを表すと考えられる。図の矢印は温度/湿度測定行った時間帯である。温度/湿度測定直後に限って同期性の大きなずれを生じているのが分かる。温度/湿度測定をする際には、測定器の構造上一度試料室の蓋を開閉しなければならない。開閉時の振動および、圧力差が作る空気の流れによって波長板の設置再現性が微妙に崩れて、同期性の変動が生じたと考えられないだろうか？(たしかに以前の時間変動を追う実験では、波長板に触れることはしなかったが試料室の蓋の開閉は行っていた。)

そこで、今度は試料室の蓋を全く閉じたままにして 1 時間のモニター観測を行った<sup>2</sup>。その結果が図 8(下) である。これを見ると、モニターを行った時間を通して 5 % の significant level の範囲では、同期性のずれはなかったということがわかる。これは、「試料室開閉時の...」という上記の仮説を支持する結果である。つまり、図 6 などに見られた比較的大きな周期性のずれも、試料固定位置の安定性とその主なる原因あることが言える。ただ、図 8(下) を見ると、非常になだらかではあるが reduced  $\chi^2$  の値が時間系列に対して増加している。リップルの安定性を崩す他の原因があるのかもしれない。

## 1.4 リップルの原因について

一応、実験結果が揃ったところでリップルの原因について考察してみたい。Donati et al.(1999) は、リップルは波長板内の界面反射による干渉が原因であろうと述べている。また、SU1/2 波長板においては互いに軸を回転させた波長板を貼りあわせているため、一枚目の波長板では常光であったものが二枚目の波長板では常光と異常光の組合せとしてみれる場合が生じる。このとき、それぞれの複屈折性によって光路差が生じ、干渉パターンが観測されることも考えられる。以上の二つの場合において、実験に現われたようなリップルが生じ得るかどうかを検証する。

### 1.4.1 リップルの周期と干渉

リップルが干渉現象によるものであるとすると、隣り合うリップルのピーク同士の関係は「光路差は同じであるが、次数が一つだけ異なる干渉パターン」ということになる。今、波長  $\lambda_1$  と  $\lambda_2$  ( $\lambda_1 < \lambda_2$ ) にリップルの強め合うピークが生じているとすると、

$$m\lambda_1 = (m-1)\lambda_2 \quad (1)$$

<sup>2</sup> その間の、温度変化は 24.3°C → 24.5°C、湿度変化は 46% → 46% であった。

表 1. SU 波長板内での反射率

|     | SiO <sub>2</sub> → MgF <sub>2</sub> | MgF <sub>2</sub> → SiO <sub>2</sub> | SiO <sub>2</sub> → 接着剤 | 接着剤 → SiO <sub>2</sub> | 接着剤 → MgF <sub>2</sub> | MgF <sub>2</sub> → 接着剤 |
|-----|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 常光  | 0.27 %                              | 0.27 %                              | 3.6e-3 %               | 3.6e-3 %               | 0.39 %                 | 0.33 %                 |
| 異常光 | 0.35 %                              | 0.38 %                              | 9.0e-3 %               | 9.1e-3 %               | 0.33 %                 | 0.39 %                 |

表 1: SU 波長板では、SiO<sub>2</sub> の軸に対し MgF<sub>2</sub> の軸が垂直になるように貼り付けているため、反射率の計算の際には常光と異常光の屈折率を入れ替えて求めている。

となる。m は次数である。さらに、 $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$  とすると、以下のような関係式が得られる。

$$\Delta\lambda = \lambda_1/m = \lambda_1^2/\Delta P \quad (2)$$

$\Delta P$  は、光路差である。

#### 1.4.2 界面での反射

干渉現象を考察する上においては、波長板を構成する試料界面での反射の程度を見積もっておくことが重要である。今、光線が屈折率  $n_1$  の媒質から屈折率  $n_2$  の媒質に入射したときを考える。このとき、反射率は以下の式で表現される。

$$R = \left( \frac{n_2/n_1 - 1}{n_2/n_1 + 1} \right)^2 \quad (3)$$

SU1/2 波長板は、SiO<sub>2</sub> ( $n_o = 1.5419$ ,  $n_e = 1.5509$ )、MgF<sub>2</sub> ( $n_o = 1.378$ ,  $n_e = 1.390$ )、そして接着剤 ( $n = 1.56$ ) の 3 種類の媒質からなるので、入射/出射の組合せとそれぞれの常光/異常光を考えれば、合計で 12 パターンの反射率が得られる (表 1)。

上表より、SiO<sub>2</sub> と接着材の界面での反射はほとんど無視できることが分かる。以下の、議論ではその面での反射は考慮しない。

#### 1.4.3 考察

まず始めに、波長板に入射した常光線と異常光線が干渉を起こした場合を考える。リップルは、常光線または異常光線のみを入射しても生じているので、常光と異常光に光路差が生まれるのは光軸に対して 57.5° 回転した第 2 層であると考えられる。SU1/2 波長板全体にとって、常光 (異常光) でも回転した第 2 層にとっては、常光と異常光を重ね合わせた光線であると捉えられるからである。

さて、SiO<sub>2</sub> と MgF<sub>2</sub> の厚みはそれぞれ、0.2796mm、0.2421mm であるので、第 2 層を透過することによって生じる光路差は、以下ようになる。

$$\Delta P = (0.2796 \times (n_o - n_e)_{\text{SiO}_2} + 0.2796 \times (n_o - n_e)_{\text{MgF}_2}) \times (2m + 1) \quad (4)$$

$$= 0.000389(2m + 1) \quad (\text{mm}) \quad (5)$$

m は次数であり、界面反射がない時を 0 次、一回反射が生じた時を 1 次... という風に定義されている。この光路差が作るリップルの周期は、式 (2) より 0 次で 11000 Å、1 次で 3690 Å である (ただし、波長は 6563 Å としてある。また、1 次光は反射を伴っているが、前節の記述より反射は MgF<sub>2</sub> 界面でしか生じないことが分かっている。したがって、1 次光は MgF<sub>2</sub> 層内のみでの反射による干渉とみるべきで、そのとき周期は 494 Å となる<sup>3)</sup>。前節の反射率の見積もりから、2 次以上の干渉

<sup>3)</sup>この周期は、リップルの大きな周期での振幅の変動(=うなり)を説明する可能性がある。

表 2. MgF<sub>2</sub> の界面で生じる光路差と対応する干渉パターンの周期

|          |       |       |       |       |       |       |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 光路差 (mm) | 4.144 | 3.480 | 2.916 | 1.597 | 0.898 | 0.668 |
| 周期 (Å)   | 1.04  | 1.24  | 1.48  | 2.70  | 4.80  | 6.45  |

表 2: 周期は、6563 Å のもの。算出には式 (?) を用いた。また、予想される反射率が非常に低い  
ため、界面での 2 重反射以上の効果は考慮していない。

パターンの存在は考えにくい。見積もられた周期は、観測によって得られたものとは全く異なる値  
を示している。したがって、常光と異常光の干渉によって数Å のリップルが作られているという仮  
説は棄却される。

続いて、波長板内の界面反射光と通常の透過光線との干渉を考える。SU 波長板の構造は、SiO<sub>2</sub>-  
MgF<sub>2</sub>-接着材-SiO<sub>2</sub>-MgF<sub>2</sub>-接着材 SiO<sub>2</sub>-MgF<sub>2</sub> のようになっているので、MgF<sub>2</sub> 面のみで反射を起こ  
したとすると全部で反射面は 6 面あり、また光路差も 6 パターンあることが分かる (表 2)。得られ  
た周期のうち、最も長いもの (6.45 Å) は実験値 (6.58 Å) に非常によく一致している。この干渉は、  
一枚の MgF<sub>2</sub> 板内での一回反射で生じる干渉に対応している。また、リップルの振幅は 6.45 Å の  
ものに比較して小さいものの理論周期値の 4.80 Å、2.70 Å に対応する周期も見られた。したがっ  
て、リップルは Donati et al.(1999) が言ったように、波長板内硝材の界面での反射光が作る干渉パ  
ターンである可能性が高い。モデルから予想される他の周期パターン (1.04 Å, 1.21 Å, 1.48 Å) が  
見えていないのは、これらの周期を産む干渉光路パターンが一つの波長板につき 1 パターンしかな  
いことが原因であると考えられる (他は、2-3 パターンの干渉光路が存在する)。これは、1 パター  
ンのみの干渉光路考えられるアクロマチック波長板で、リップルが見えていない事と一致する結果  
である<sup>4</sup>また、周期 1.04 Å と 1.48 Å のものは、ちょうどそれらが実験の際の分解能 ( $\Delta = \lambda/0.5$  Å)  
の調和周期にあたるので、サンプリングのランダムエラーが支配的となって振幅の小さなリップル  
が打ち消されている可能性もある。3 Å 以下のリップルの周期の存在は、キャリブレーションをす  
る上で非常にやっかいである。

リップル周期の面から、波長板の界面反射モデルがリップルの成因としてもっともらしいことが  
言えたが、このモデルによって最高 3% にもおおよぶリップルの振幅を説明できるであろうか？波長  
板の界面での反射によって干渉が生じるということは、言い換えれば「ファブリ・ペロー干渉計」  
が波長板内で自然に構成されているということである。理想的なファブリ・ペロー干渉計を通過し  
た時に得られる光度 ( $= I_t$ ) は、入射光度を  $I_0$  とすると以下の式で表現される。

$$I_t/I_0 = \frac{1}{1 + [4R \sin^2(\delta/2)] (1 - R)^{-2}} \quad (6)$$

ここで、 $R$  は界面での反射率、 $\delta$  は光線の位相差である。リップルの peak-to-peak とは、 $I_t$  が最大  
のときと最小の時の比で決まるので、上式より (peak - to - peak)  $= 1 - \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R}$  である。MgF<sub>2</sub>  
の両端面の反射率は、接する材質が SiO<sub>2</sub> の場合も接着材の場合もおおよそ 0.3% なので、一層の  
MgF<sub>2</sub> が作る peak-to-peak の値は ~1.2% となる。SU1/2 波長板のように、MgF<sub>2</sub> 層が 3 層あると  
するとその 3 倍の peak-to-peak 値が得られると考えられるので、見積りは実験値と遜色なく一致  
する。したがって、リップルの原因は波長板硝材界面内での多重反射によるものであると断定して  
ほぼ間違いなからう。

<sup>4</sup> さらに S/N を挙げたその後の追実験では、アクロマチック波長板にも振幅にして非常に小さい (< 0.2% 以下)、MgF<sub>2</sub>  
層内での多重反射と見られるリップルがあることが確認された (1999 Nov.17 現在)。SiO<sub>2</sub> 内の反射と見られるものも認め  
られなくはなかったが、MgF<sub>2</sub> 層が原因とみられるリップルほどははっきりしたものではなかった。

リップルの原因が、特定されたところで温度変化に伴う周期の変動を見積もりを行ってみたい。周期 6.45 Å のものについて周期の変動量を  $\delta(\Delta\lambda)$  とすると、式 (2) より、

$$\delta(\Delta\lambda) = \lambda^2(1/\Delta P - 1/(\Delta P + \delta(\Delta P))) \quad (7)$$

$$= \frac{\lambda^2}{2n_{\text{MgF}_2}}(1/l - 1/(l + \Delta l)) \quad (8)$$

$$\simeq \frac{\lambda^2 \Delta l}{2n_{\text{MgF}_2} l^2} \quad (9)$$

$$\simeq \frac{\lambda^2 \alpha \Delta T}{2n_{\text{MgF}_2} l} \quad (10)$$

となる。ここで、 $l$  は  $\text{MgF}_2$  の厚さ、 $T$  は温度、 $\alpha$  は  $\text{MgF}_2$  の線膨張率である。今、 $\lambda = 6563 \text{ \AA}$ 、 $n_{\text{MgF}_2} = 1.38$ 、 $l = 0.2421 \text{ mm}$ 、 $\alpha = 1.37 \times 10^{-6}$  とすると、周期変化として  $\delta(\Delta\lambda) = 8.8 \times 10^{-5} \Delta T \text{ \AA}$  が得られる。これは、温度が  $100^\circ\text{C}$  変化しても  $0.01 \text{ \AA}$  しか周期が変動しないことを示すので、事実上温度変化に伴うリップルの周期の変動はないことを示す。

## 1.5 まとめと結論

SU1/2 波長板を通過した光線において、過去に幾例か報告されているリップルが生じるかどうかの実験を行った。その周期は、過去のものとは多少異なっていたが、我々の SU1/2 波長板でもたしかにリップルが生じていることが確かめられた。それらの周期/振幅/同期性は実験の精度の範囲内では有意な変動がないことも確認した。リップルは波長板内の素子界面での反射が作る干渉と非常によい一致を示すことが分かった。1-2 Å 周期のリップルをキャリブレーションすることは、一般的には非常に困難であると考えられる。また一方で、温度膨張に伴う素子の膨張が作るリップルの周期の変動はおおよそあり得ないことが確かめられた。

詳しい実験/解析により、アクロマチック波長板にも非常に小さいながらリップルが生じているのも確認された。SU1/2 波長板と同様に素子層内の多重反射が作る干渉パターンであろうことも示唆された。

時間によるリップルの変動現象は、おおよそないと考えられる。SU1/2 波長板もアクロマチック波長板も程度の差はあるにしても、どちらもリップルを生じているので、よりアクロマチックが達成されている SU1/2 波長板をモジュラーとして採用すべきかと思われる。しかしながら、SU1/2 波長板にはアクロマチック波長板には認められなかったより周期の短いリップル ( $< 2 \text{ \AA}$  @ 656 nm) が存在しており、こうした短い周期のリップルをキャリブレーションによってとり除くことの困難さを考慮すると、アクロマチック波長板を用いた方がよいのかもしれない。

波長板のリターダンスのクロマチック性が作る常光線もしくは異常光線の系統的エラー ( $\Delta I$ ) は以下の式で表現される (Kawabata et al .1999)。

$$\Delta I = -I(\lambda) \Delta_\tau(\lambda)^2 / 8 [q(\lambda)(1 - \cos 4\phi) - u(\lambda)(1 - \cos 4\phi)] + \Delta_\tau(\lambda) v(\lambda) [\sin 2\phi + \Delta_\phi \cos 2\phi] \quad (11)$$

ここで、 $\Delta_\tau(\lambda)$  は波長板の目的とするリターダンスからのずれ、 $\Delta_\phi$  は波長板方位角  $\phi$  からのずれ、 $q(\lambda)$ 、 $u(\lambda)$ 、 $v(\lambda)$  は目的天体光の企画化されたストークスパラメーターである。アクロマチック波長板の場合、例えば青緑域 (400 nm - 600 nm) で  $\Delta_\tau(\lambda) = \pm 7^\circ$  が達成可能である。星間円偏光度の典型的な値  $v(\lambda) = 10^{-4}$  を使うと、システムチックエラー値として  $\Delta_\tau(\lambda)^2 P/4 \sim P/270$  が得られる。これは 30 % 以上の偏光度が生じて初めて 0.1 % のエラーとなるくらい小さなものなので全くもって問題ないと言える。



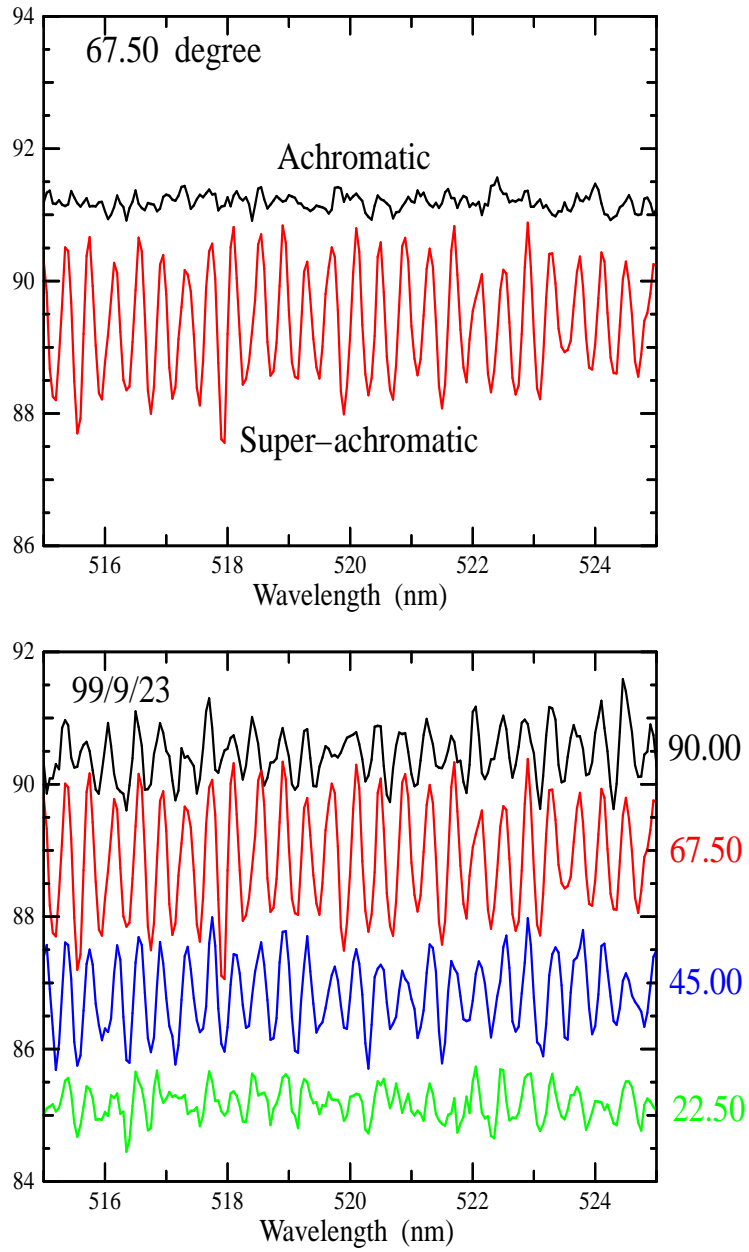


図 1: 上図: SU1/2 波長板とアクロマチック波長板の透過率の比較。明らかに SU1/2 波長板でリップルが認められる。下図: 各方位角でのリップルの変化。

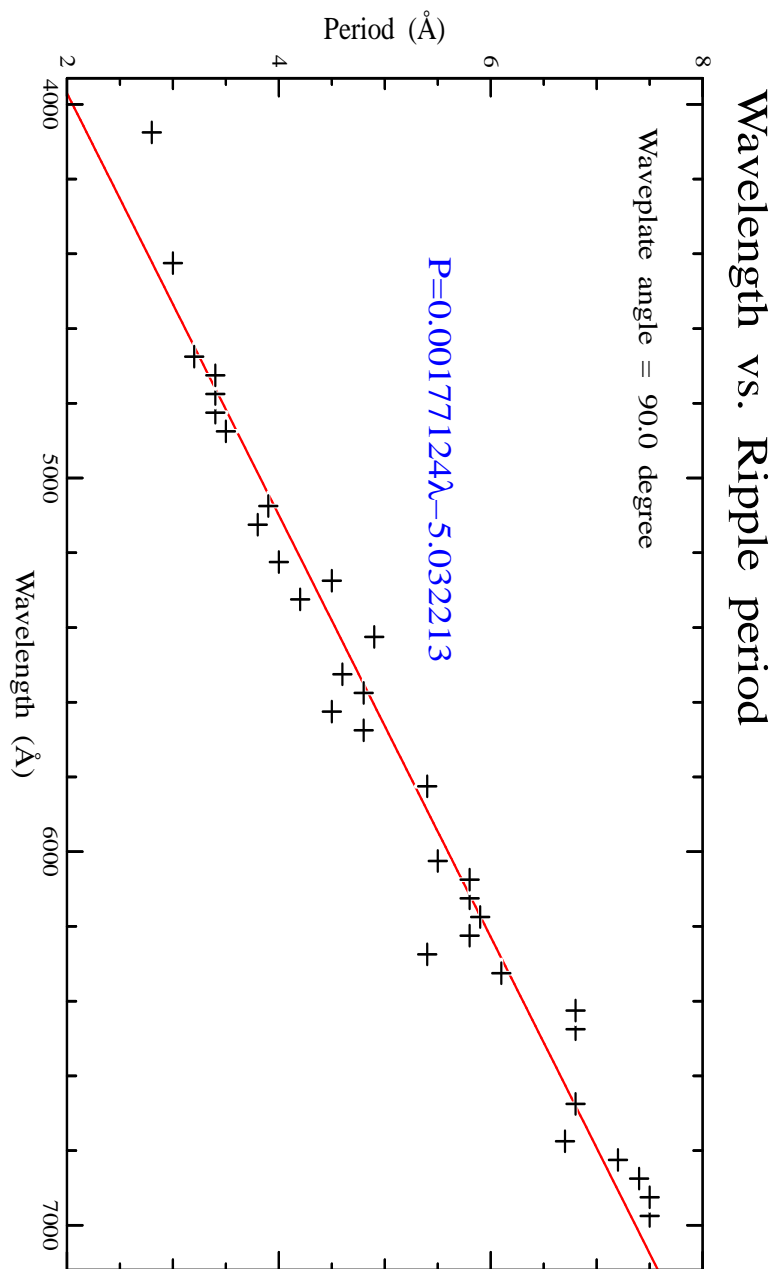


図 2: 波長に対するリップルの周期変化。波長に対してリニアに周期が増加している様子が伺える。

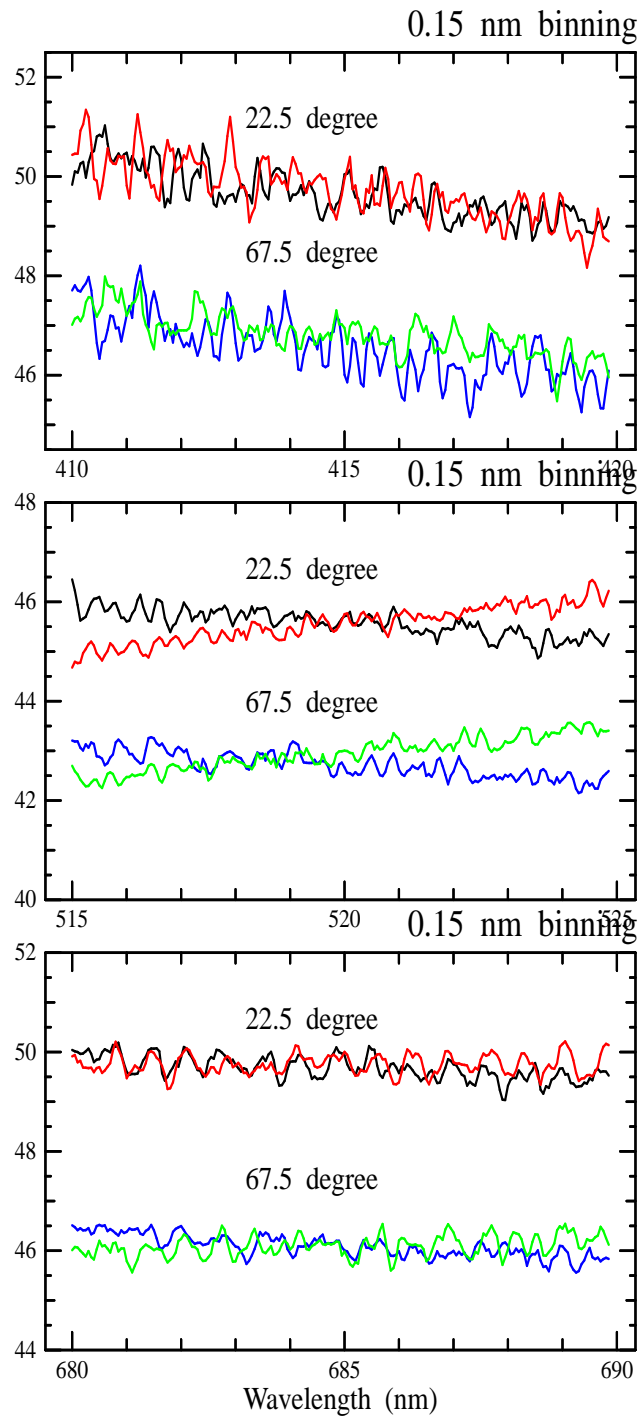


図 3: SU1/2 波長板透過後の常光/異常光のリップルの比較。

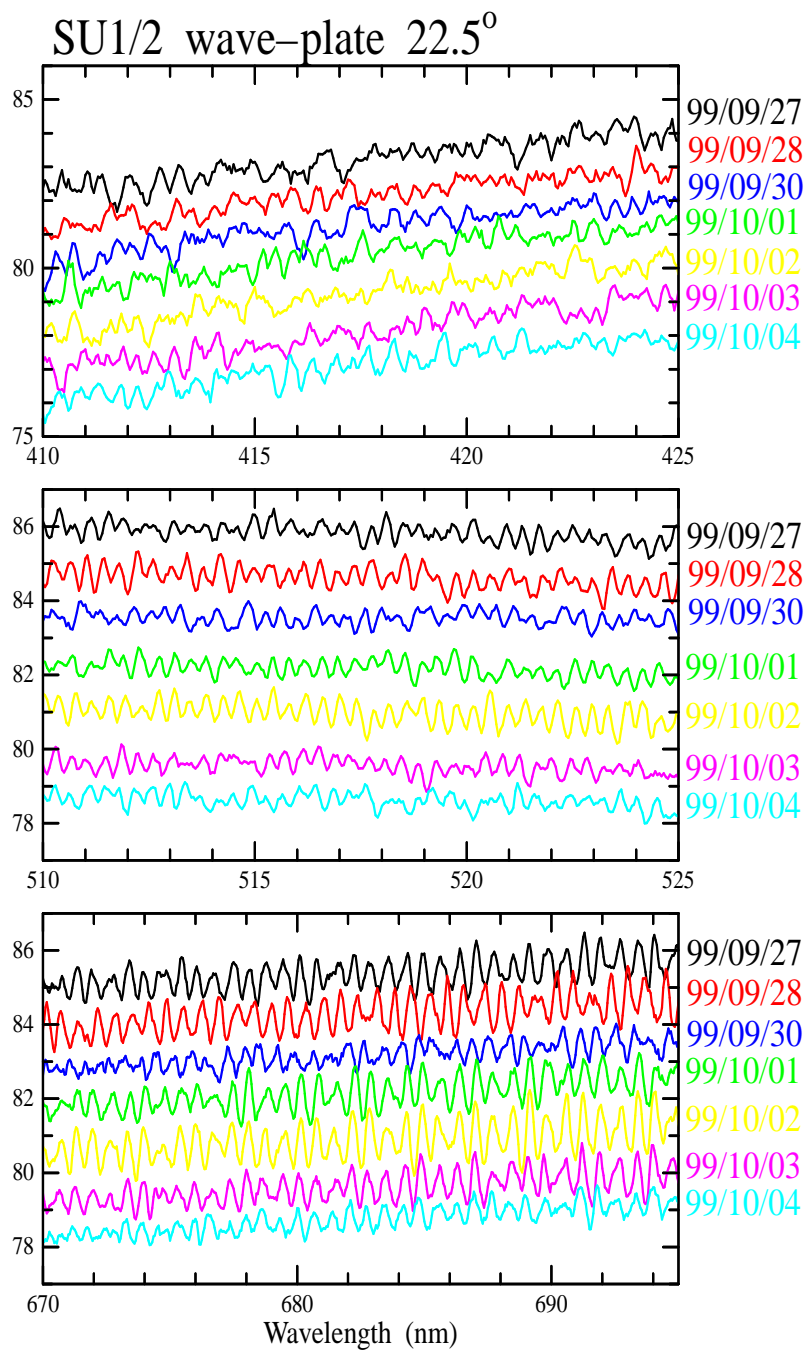


図 4: 各波長域におけるリップルのモニター観測の結果 (日変化、9/28-10/4)。

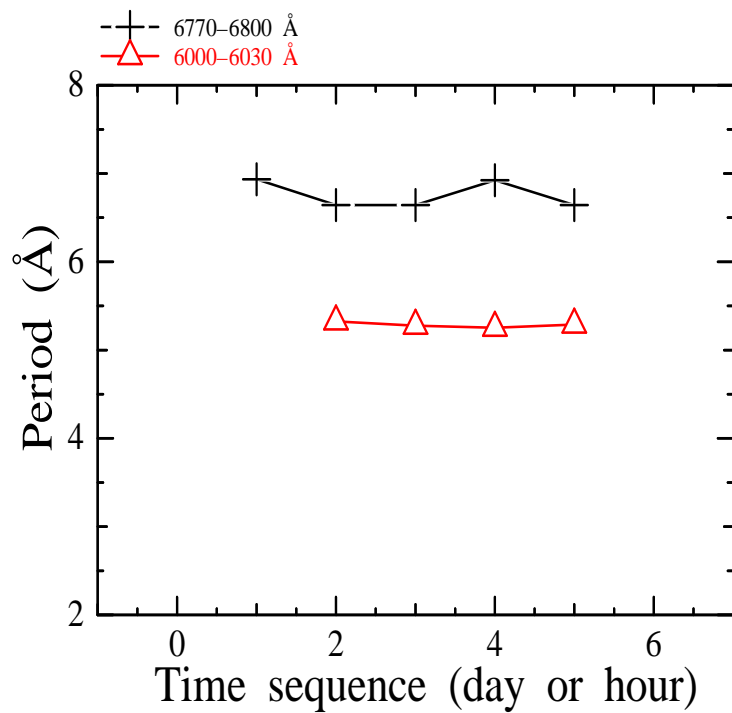
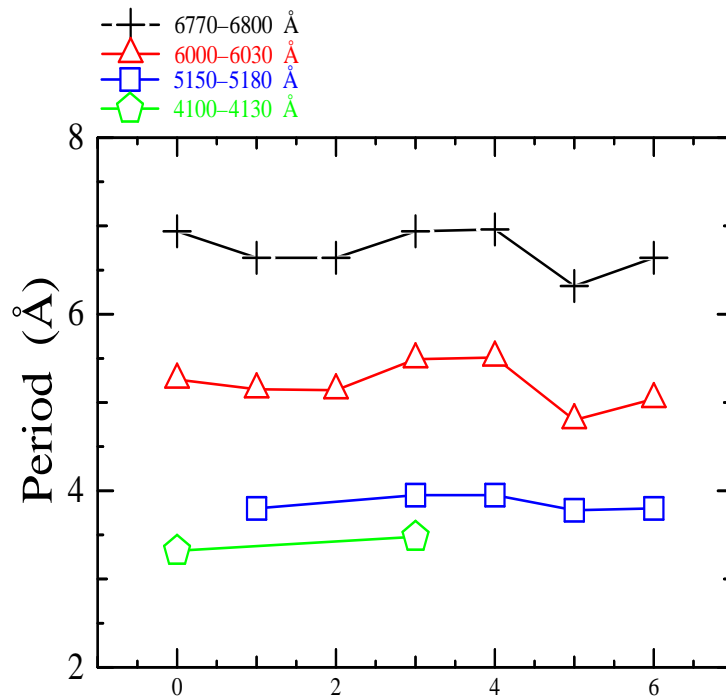


図 5: リップルの周期の変動の様子。横軸は、時間系列で日 (上図) または時間 (下図) を表す。日変化のグラフでは、長い方の波長域 (677-680 nm と 600-603nm) で周期変動の振る舞いが同期しているように見える。

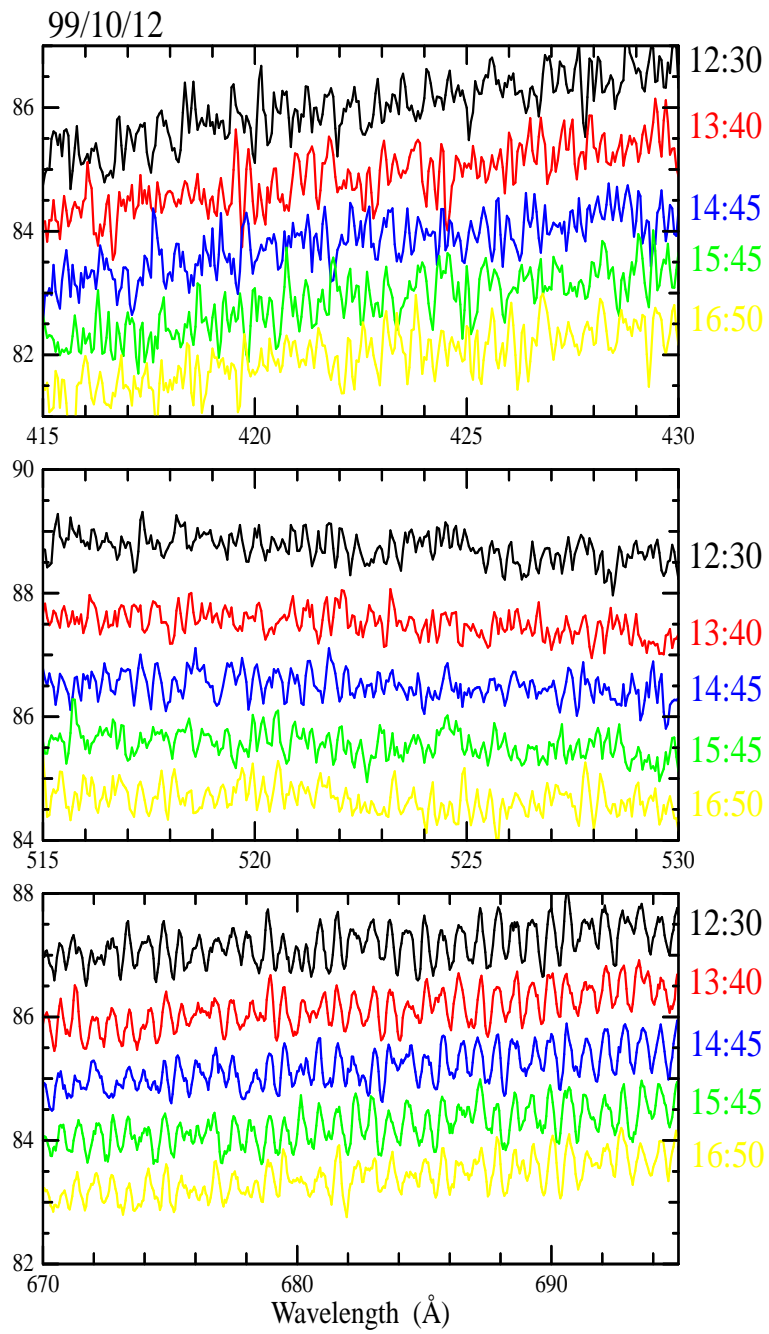


図 6: 各波長域におけるリップルのモニター観測の結果 (時間変化、10/12)。

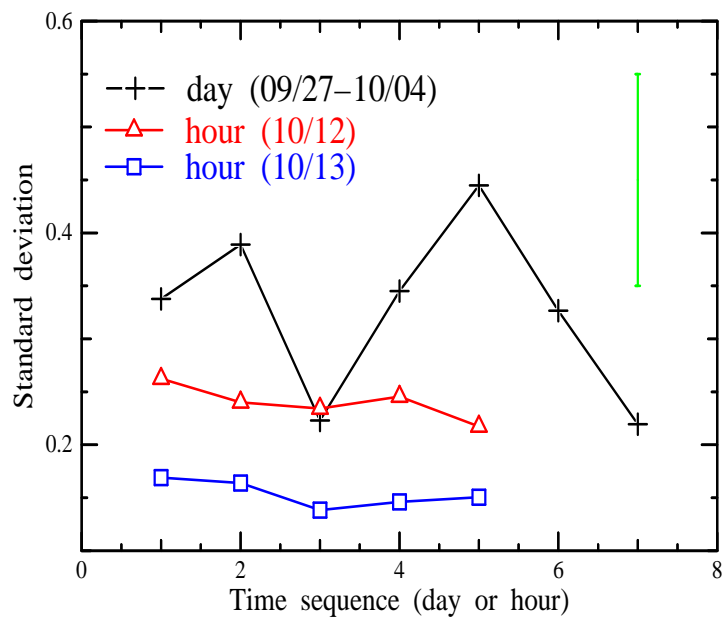


図 7: リップルの振幅の度合の時間変動。横軸は、時間系列で日または時間を表す。日単位では大きな変動を示しているのに対し、時間単位ではそれほど大きな変動はない。

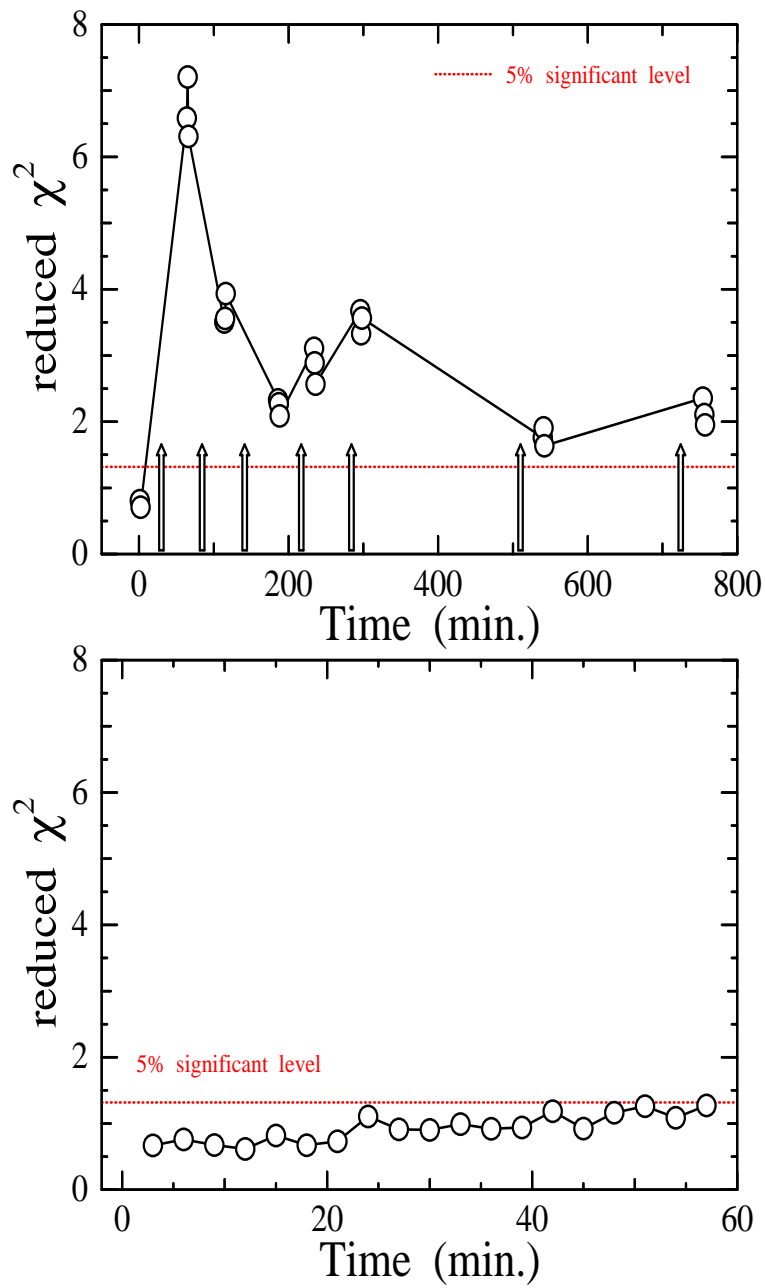


図 8: 時間系列の最初の測定値に対する、各時間帯の測定値の reduced  $\chi^2$  の時間変動の様子。