

Tomo-e Gozen とせいめい望遠鏡による 恒星フレアの同時観測

倉島 啓斗, 根津 正大, 酒向 重行, 小林 尚人, 新納 悠, 松林 和也, 長澤 春香,
Tomo-e Gozenチーム (東京大学), 村田 勝寛, 川端 美穂, 田口 健太 (京都大学)

目次

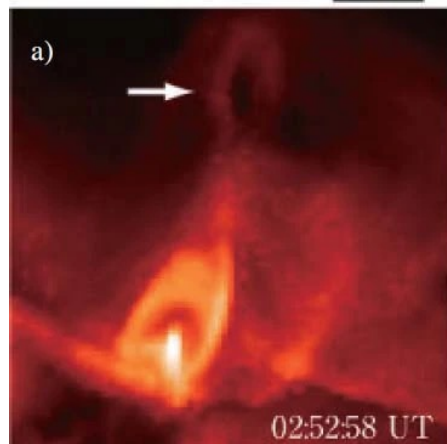
1. 導入
2. Tomo-e Gozen U バンド観測でのフレア増光率の見積もり
 - 方法
 - 結果
 - 議論
3. Tomo-e Gozen とせいめい望遠鏡/TriCCS による恒星フレアの同時観測
 - 観測
 - 解析と結果
 - 議論
4. まとめと今後

恒星フレア

- 磁気リコネクションによって磁場エネルギーが熱・運動エネルギーへ変換される
恒星表面での爆発現象。
- 多様な波長の電磁波を放出。
- 太陽以外の恒星では、恒星を空間分解して観測できないため、光度曲線中に**突発的な増光・緩やかな減光**として観測される。

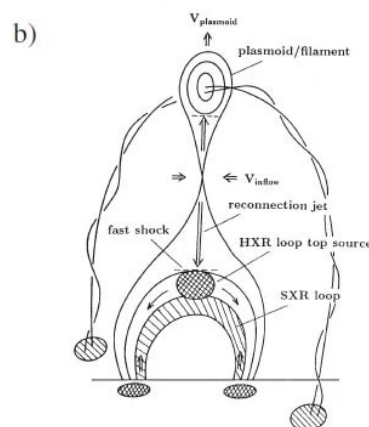
ようこう衛星が軟X線で
捉えた太陽フレア

100,000 km



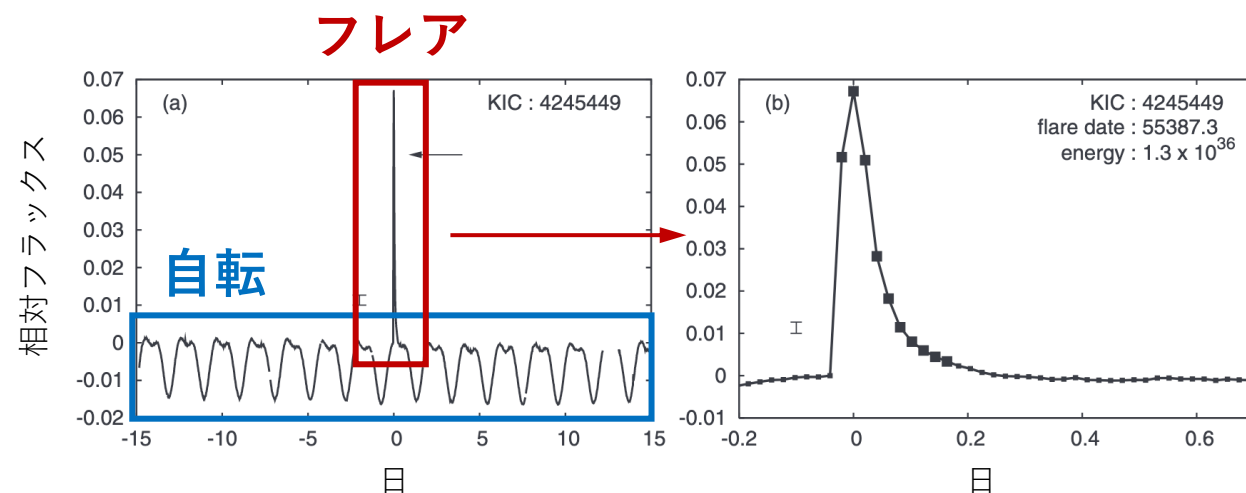
Shibata & Magara (2011)

フレアの磁気リコネクションモデル



Shibata & Magara (2011)

ケプラー衛星によるG型星のスーパーフレアの光度曲線



Shibayama (2013)

恒星フレアの高速観測, U バンド観測

• 高速観測

- フレア観測例のある探査衛星TESSの時間分解能は最速 20sec 間隔
- 観測される典型的なフレア ~ 10 min
- Tomo-e Gozen は最速 0.5 sec 間隔



利点

- **高時間分解**による光度曲線の詳細な解析
- 継続時間が短い小規模なフレア ~ 1 min まで**検出数が増加**

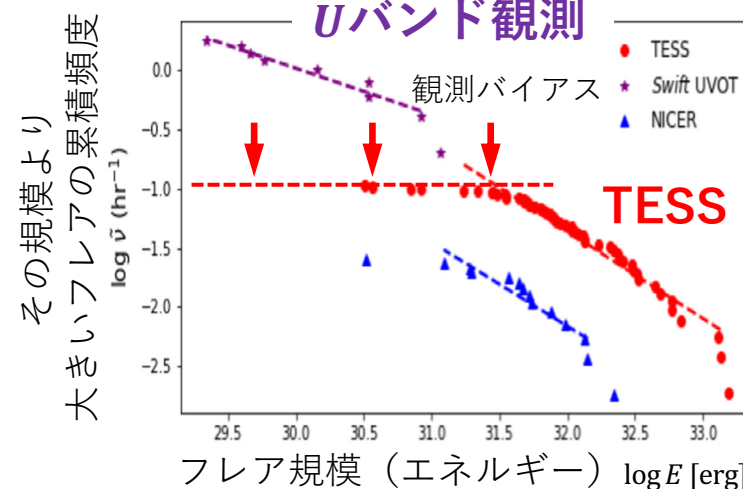
• U バンド観測

- TESS ($\sim R$ バンド) では**小規模フレアの累積頻度に上限**がある。
→ 小規模フレアは増光が小さくノイズに埋もれ観測が難しい
- U バンドでは小規模フレアまで観測されている。



利点

- U バンドでは、星が暗くフレアが明るく観測され、**コントラストが向上**し、小規模フレアの増光率が大きくなる。



本研究の取り組み

1. Tomo-e Gozen *U*バンド におけるフレア増光率の見積もり

- *U*バンドフィルタの有無で、フレア増光率を見積もる。

2. Tomo-e Gozen *U*バンド 高速撮像 + せいめい/TriCCS 高速分光 によるフレア同時観測



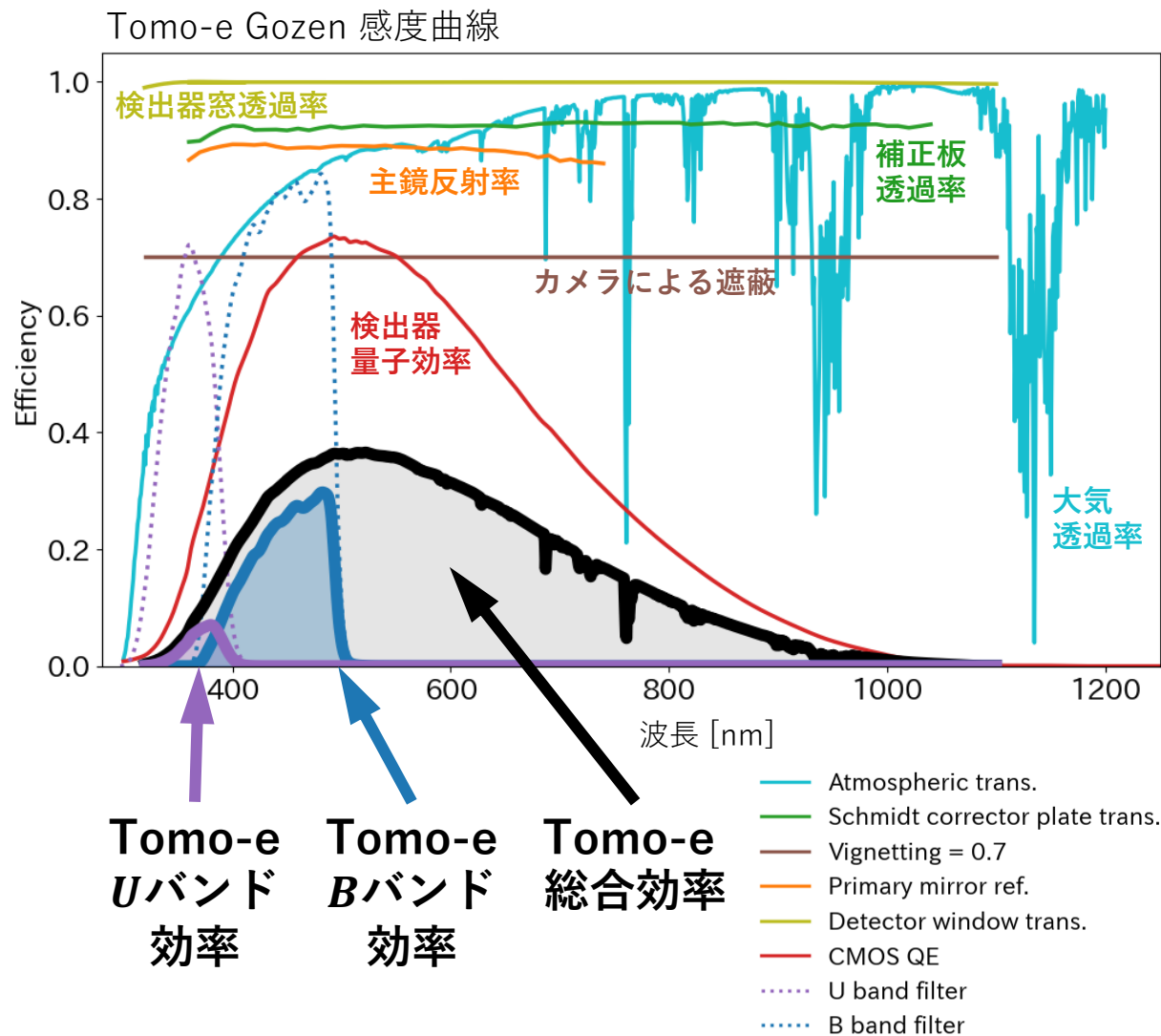
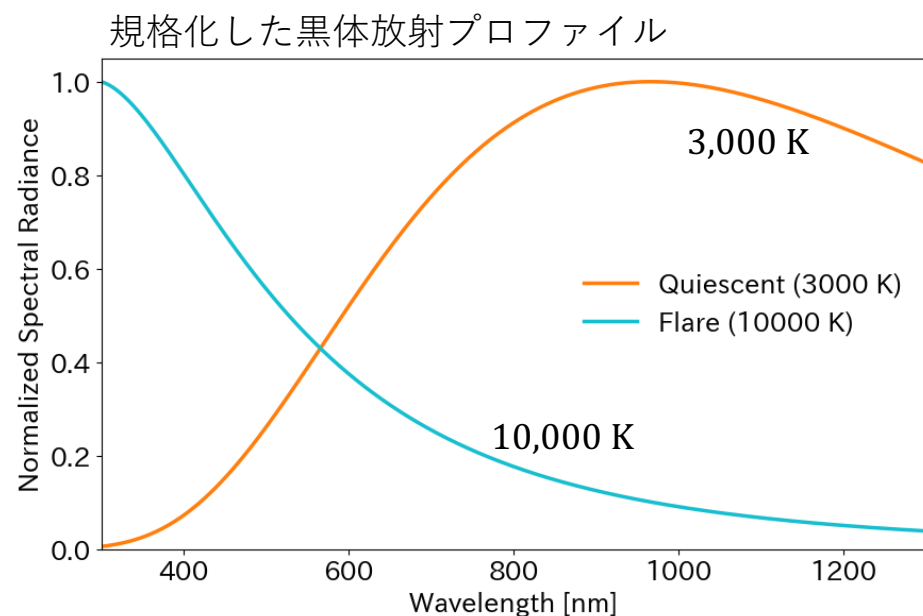
小規模フレアの検出、
フレア発生時のスペクトル時系列変化の取得を試みる。

方法: Tomo-eフレア増光率計算

- 黒体放射を仮定

M型星表面 3,000 K
フレア成分 10,000 K

- Tomo-e Gozen 感度曲線を適用
- フィルタ無しで 10% 増光するフレアに対し、*U*バンド, *B*バンド観測時の増光率を計算

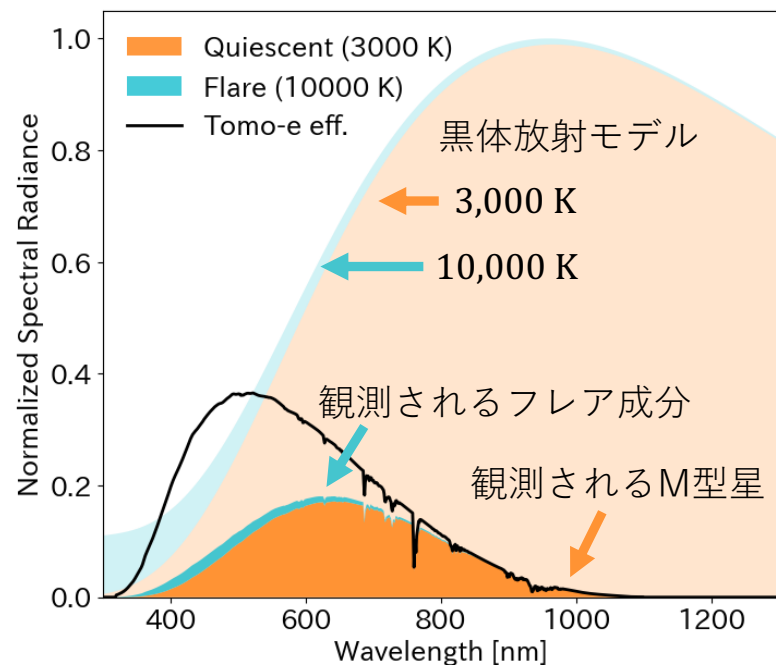


結果: Tomo-eフレア増光率

同じフレアを観測した場合、*U*バンドでの増光率が大い。

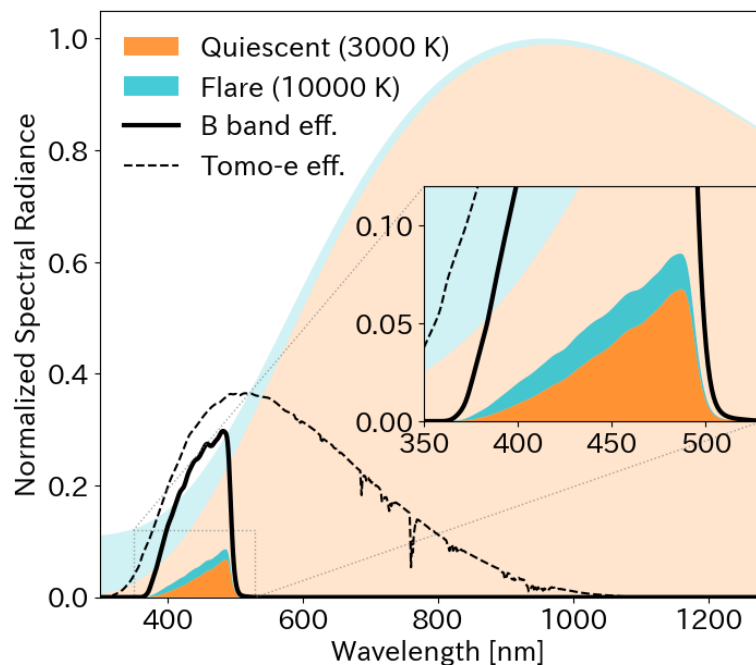
フィルタ無し

静穏時信号比 1 (基準)
フレア時増光率 +10 %



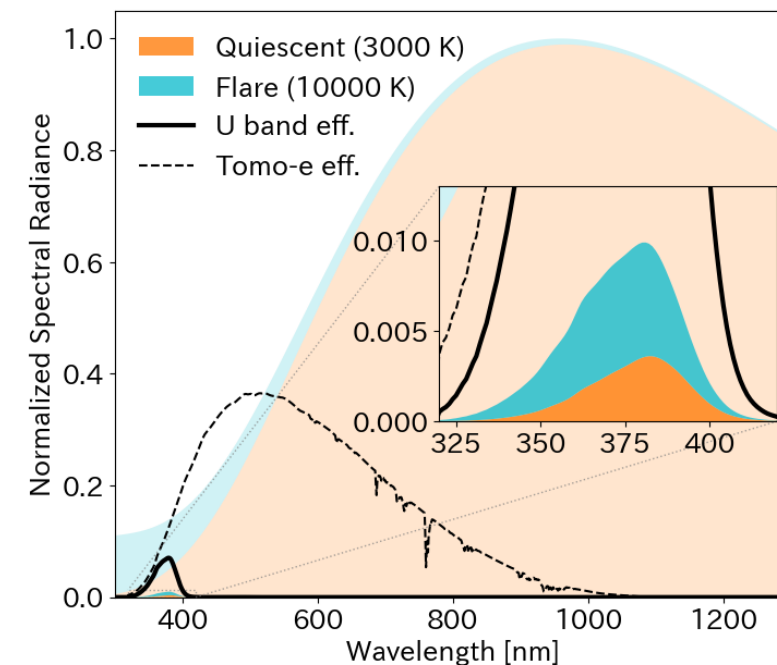
B バンド

静穏時信号比 0.0662
フレア時増光率 +46.1 %



U バンド

静穏時信号比 0.0022
フレア時増光率 +204.9 %



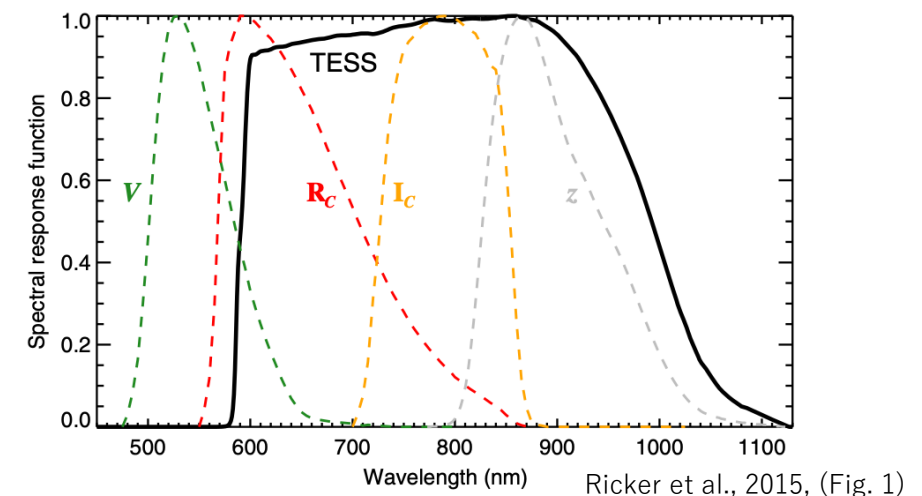
議論: Tomo-eフレア増光率

- U バンド観測ではフレア増光率が大きい。
 - 観測天体が明るく、背景光ノイズやシンチレーションが支配的な場合に有利
 - 観測天体が暗い、または露光時間が短い場合には、読み出しノイズが支配的になり効果なし？
- TESS 感度が系外惑星探査に最適化されているため ($\sim 580 - 1000$ nm)、Tomo-e Gozen では U バンドの観測ができる点で有利

Tomo-e Goze によるM型星およびフレアの増光率 (再掲)

	静穏時信号比	フレア時増光率
フィルタ無し	1 (基準)	+10 %
B バンド	0.0662	+46.1 %
U バンド	0.0022	+204.9 %

TESS の感度曲線



同時観測

観測天体：**YZ CMi** M4V, 11.2 mag (V)

- フレア活動が非常に活発
- 小規模フレアであれば毎晩発生

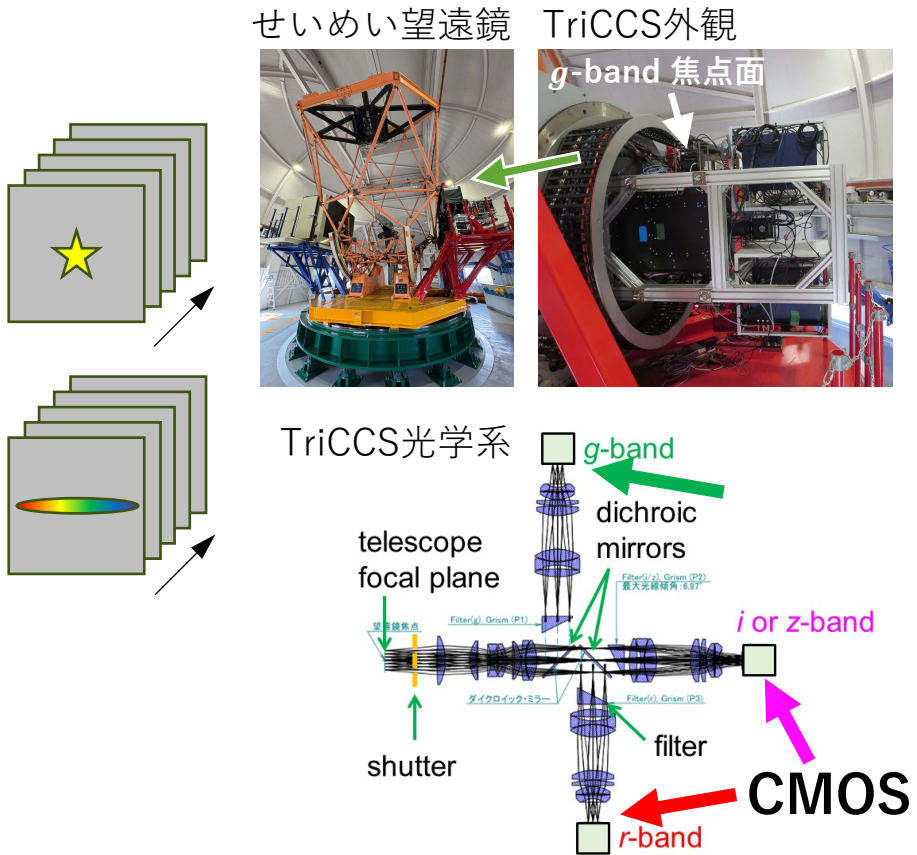
測光：**木曾シュミット望遠鏡/Tomo-e Gozen**

- 5 sec 露光で (0.2 fps) *U*バンド高速撮像

分光：**せいめい望遠鏡/3色同時撮像分光装置 TriCCS**

- 0.033 msec 露光で (30 fps) 高速分光 R~700

観測諸元	
観測天体	YZ Cmi (M4V, 11.2 mag (V))
日付	2025年11月25日 – 11月27日, 3夜
同時観測時間	~ 2 hr
測光	木曾シュミット望遠鏡/Tomo-e Gozen, 0.2 fps
分光	せいめい望遠鏡/TriCCS, 30 fps, R~700, slit 1"

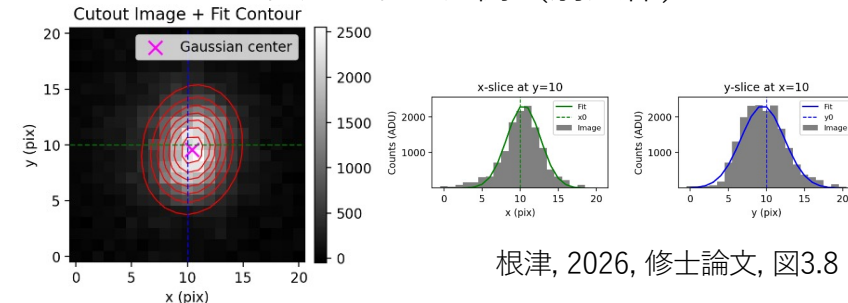


解析, 結果: 恒星フレアの検出

解析:

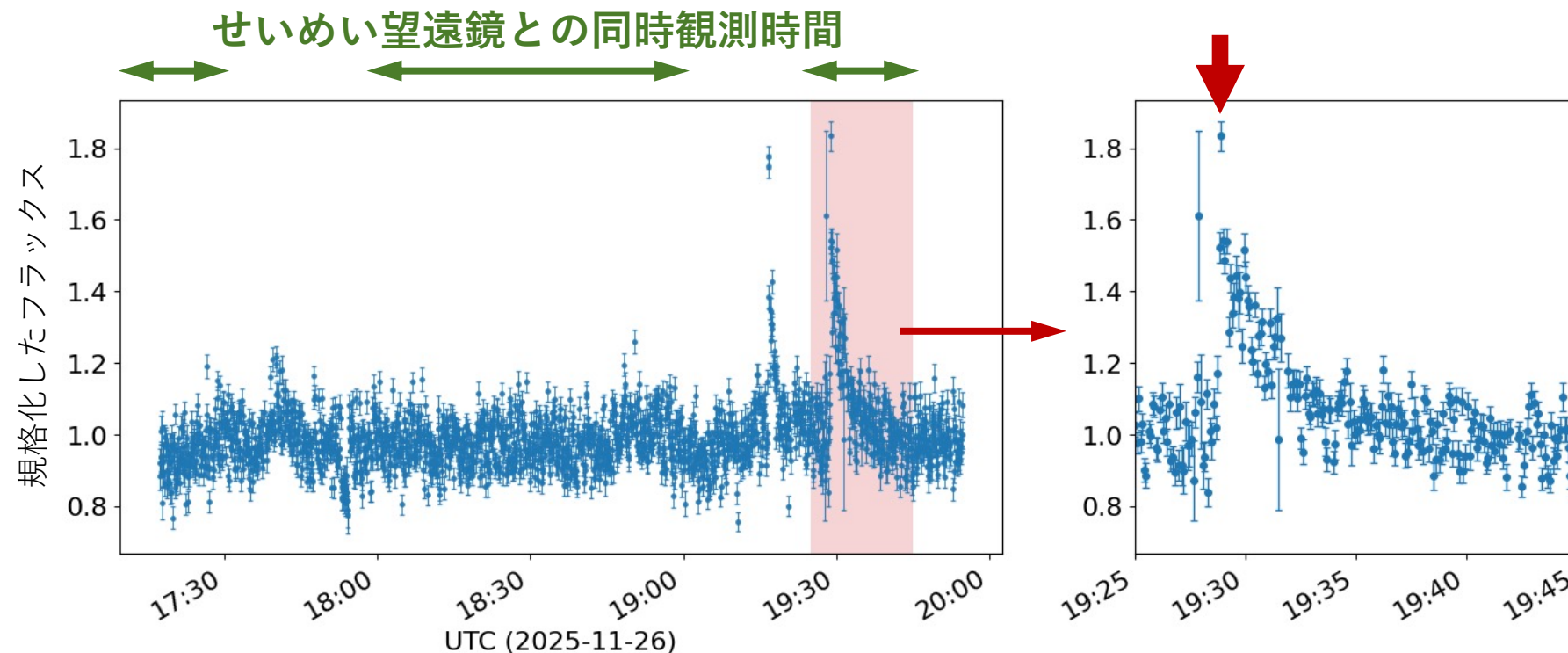
- Tomo-e Gozen による U バンド高速連続撮像データを **PSFモデルフィッティング** (根津, 修士論文, 2026) により測光
- YZ CMi の時系列光度変動を解析

PSFモデルフィッティング例 (別天体)



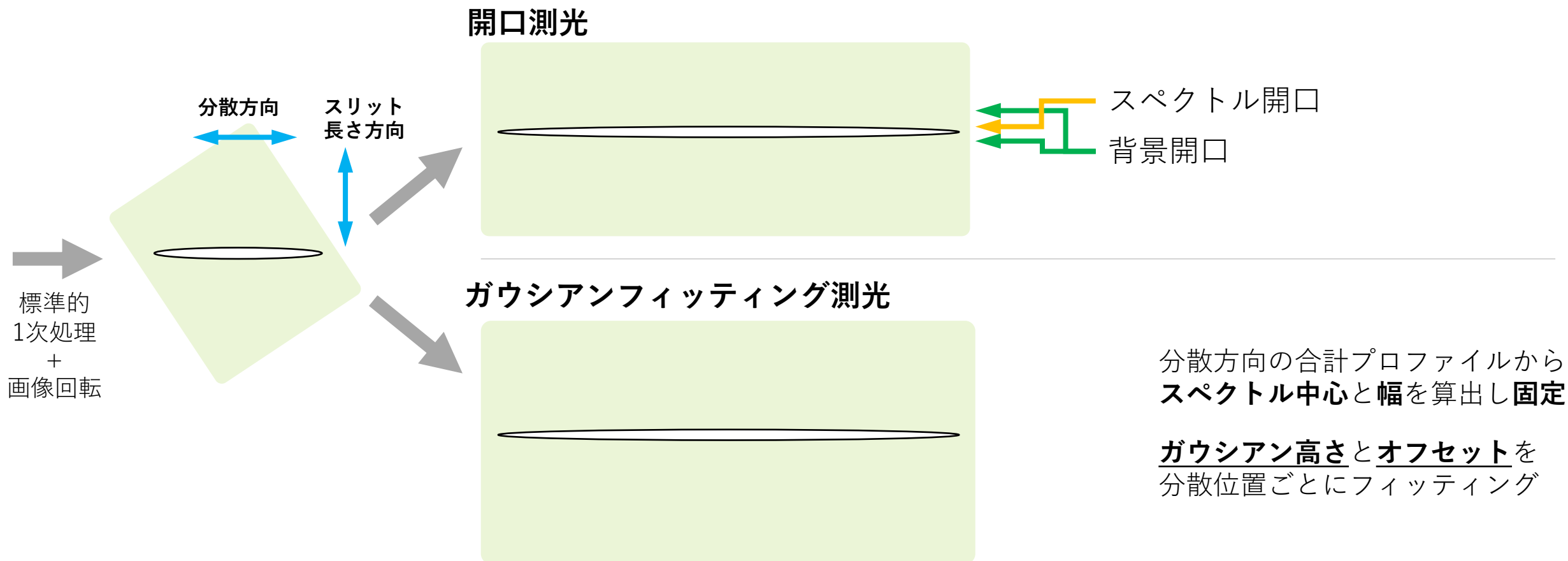
結果:

- 同時観測中に
恒星フレアを1例検出
- 最大 ~ 1.6 倍に増光
→ 増光率 +60 %



解析: スペクトル抽出

- 開口測光とガウシアンフィッティング測光の2手法によりスペクトルを抽出

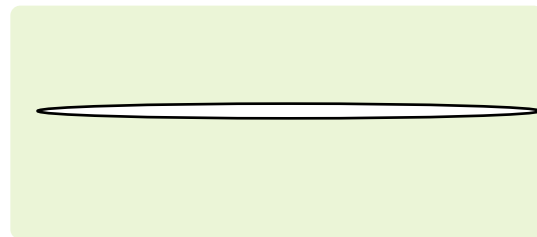


結果: スペクトル抽出

- ・ ガウシアンフィッティング測光では開口測光よりスペクトル品質が向上。

開口測光

120 sec スタック



開口

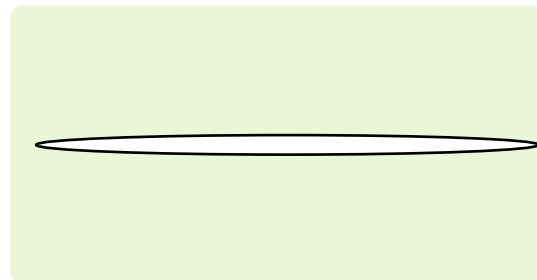
背景

せいめい/TriCCS *g*バンド 120 秒スタック

$$\text{測光値} = \text{開口} - \text{背景}$$

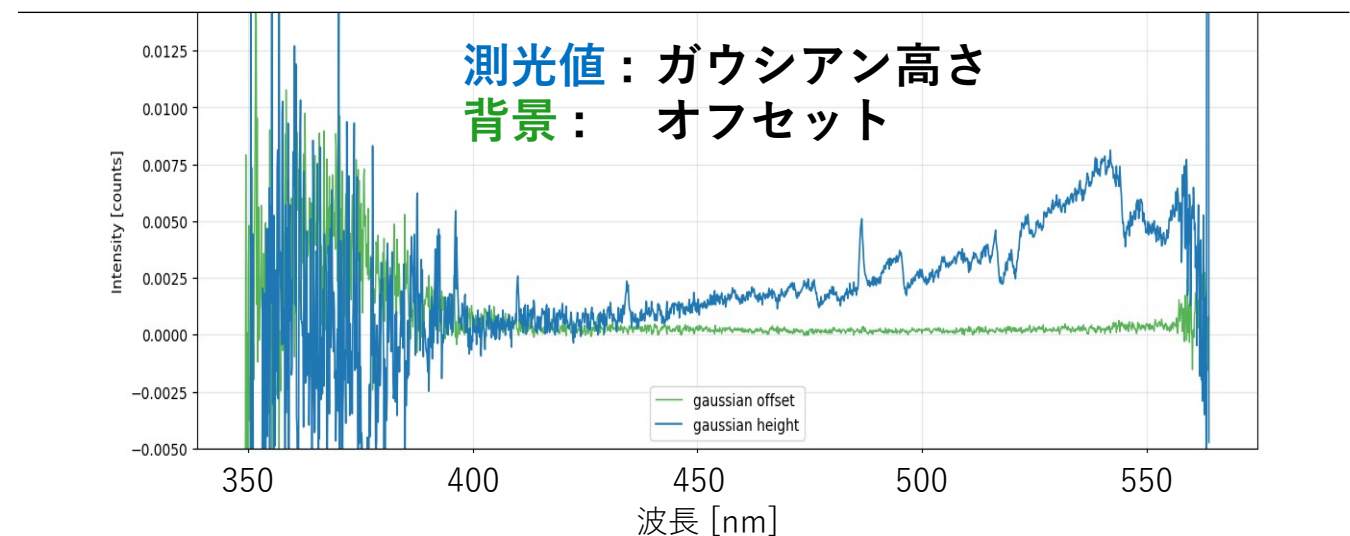
ガウシアンフィッティング測光

120 sec スタック



背景

測光値



結果:フレア時と静穏時のスペクトル比較

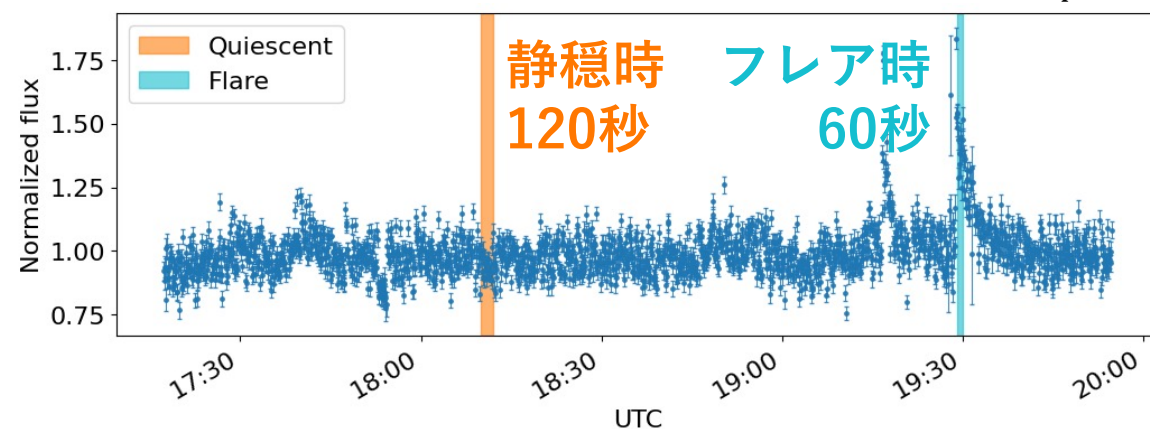
- 分光データをスタックし
スペクトル抽出した。

静穏時 120秒スタック (3600 フレーム)

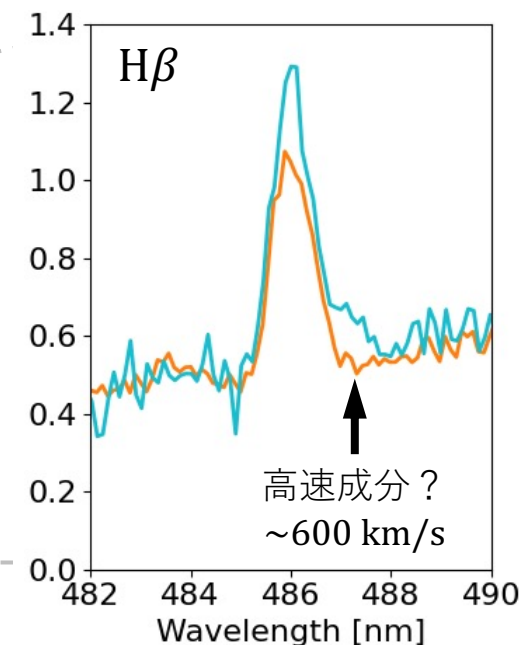
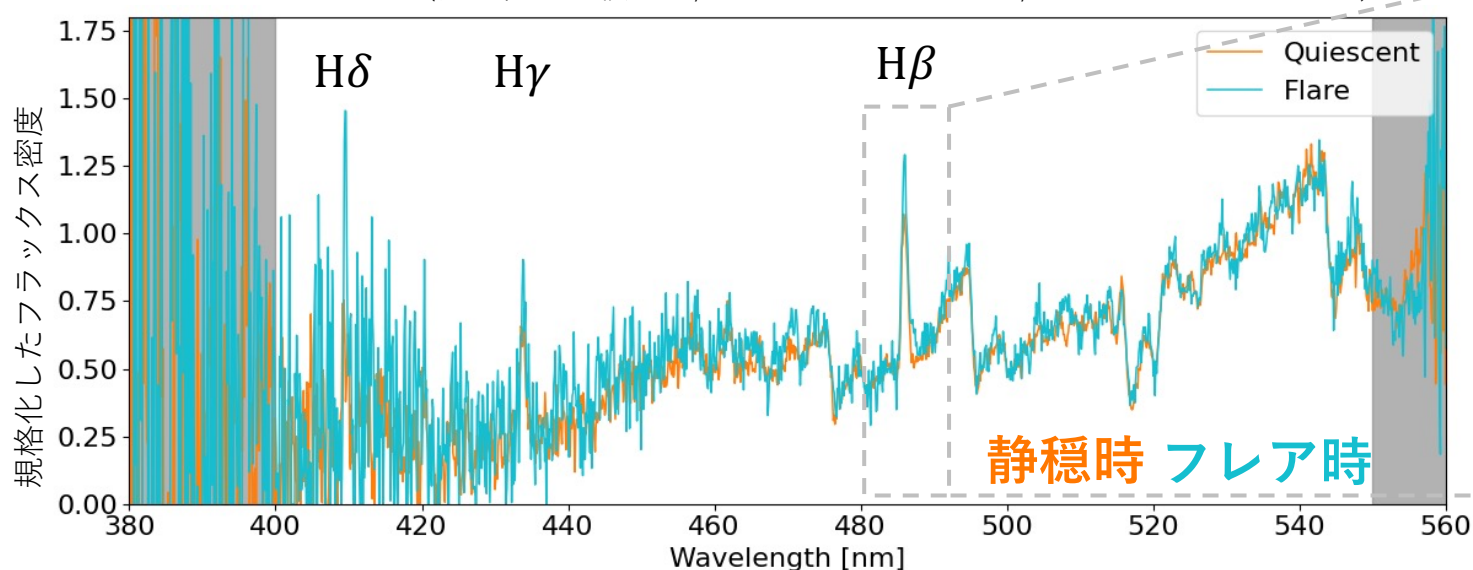
フレア時 60秒スタック (1800 フレーム)

- H β 輝線 等価幅がフレア時に増加

YZ CMi 光度曲線 (木曾シュミット/Tomo-e Gozen Uバンド, 0.2 fps)



YZ CMi スペクトル (分光標準星較正済, 静穏時120秒スタック, フレア時60秒スタック)



H β 等価幅

静穏時 1.00 nm

フレア時 1.20 nm

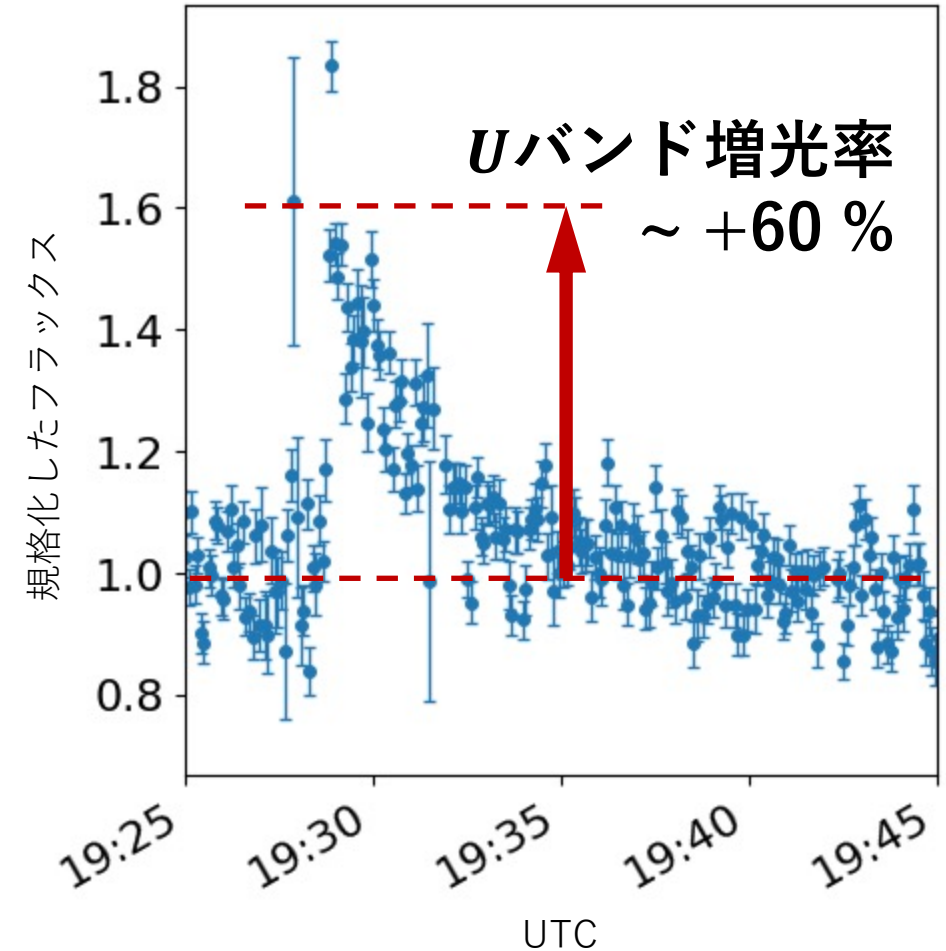
議論: 光度曲線

- Tomo-e Gozen 観測でのフレア検出例は、**Uバンド増光率 +60%** であり、**フィルター無し増光率 +3%**と見積もられる。



- 光度変動 3%は Tomo-e Gozen **検出限界に相当。**
(根津, 修士論文, 2026)
- Tomo-e Gozen フィルター無し観測では見逃されていた可能性がある。

YZ CMi 光度曲線
木曾シュミット/Tomo-e Gozen Uバンド, 0.2 fps



議論: スペクトル連続成分

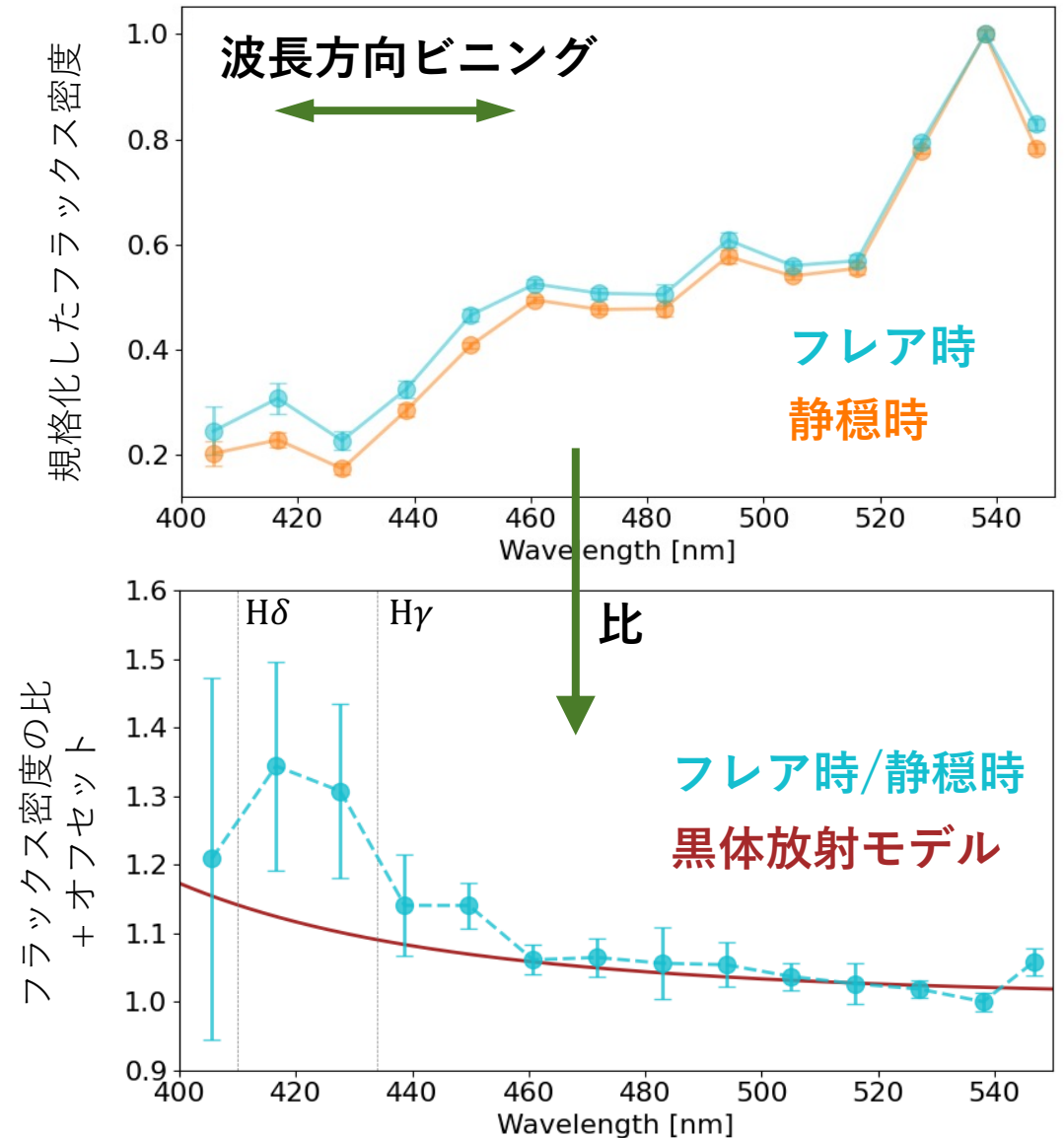
- スペクトルを波長方向にビンニングすると
フレア時に短波長側の増光が見られる。
 - ビンニング時に輝線成分を取り除いていない。
- 静穏時とフレア時のスペクトル比の形状は
黒体放射モデルのスペクトル比の形状と
矛盾しない。

黒体放射モデルパラメータ

	放射温度	構成比
静穏時M型星	3000K	1
フレア	10000K	0.03

↑
Uバンド増光率 +60%に対応した重み付け

YZ CMi スペクトル, 200ビンニング
静穏時120秒スタック, フレア時60秒スタック



まとめと今後

- 恒星フレアは恒星表面の爆発現象。突発的な増光・緩やかな減光が見られる。
- Tomo-e Gozen で恒星フレアを観測した際の増光率を計算し、フィルター無しで+10%増光する時、**Uバンドでは +204.9% 増光**することを確認した。
- フレア活動が非常に活発な YZ CMi に対する、木曾シュミット望遠鏡/Tomo-e による測光と、せいめい望遠鏡/TriCCSによる分光の同時観測を実施した。
- PSFモデルフィッティング測光により**Uバンド増光率+60%のフレアを1件検出**した。
- 同時観測の g バンド分光データを解析し、**ガウシアンフィッティング測光**によるスペクトル品質の向上を確認した。
- フレア時の分光スペクトルでは、短波長側の増光を確認した。
- 今後、 $r, i + z$ バンドのデータを合わせて、さらに時間分解した解析を実施し、輝線強度や連続成分による温度変化を探る。