

岡山大学天文台の
系外惑星トランジット観測

岡山大学 理学部 地球科学科

05428524 山下 美聖

2020/02/14

要旨

系外惑星とは、太陽以外の星の周りを公転する惑星のことである。公転する惑星が中心星の前面を通過することをトランジットと呼び、トランジットが起こる際、惑星が中心星の一部を隠すため、観測者が見る中心星の明るさは一時的に減少する。トランジットによる中心星の減光は、中心星の大きさと惑星の大きさによって決まる。そのため、減光の大きさを測定することで、中心星に対する惑星の大きさを測ることができる。また、惑星が中心星のどこを横切るかによって、ライトカーブの形は変化し、減光の継続時間も変化する。これらを見ることで、系外惑星の公転に関する情報が得られる。

本研究は、岡山大学天文台で CMOS カメラ (QHY174M-GPS) を用いて、系外惑星 X0-2b と HAT-P-20b によるトランジットの観測を行った。観測結果から推定されたトランジットの開始・終了時刻、継続時間、減光の大きさは先行研究の結果と整合的であり、岡山大学天文台の観測システムで系外惑星トランジットの観測は可能であることが示された。

目次

第1章	序章	4
1.1	系外惑星トランジット	4
1.2	研究概要	4
第2章	観測	5
2.1	観測	5
2.2	観測機材	5
2.3	観測方法	6
第3章	解析	7
3.1	一次処理	7
3.1.1	ダーク引き	8
3.1.2	フラット割り	9
3.2	測光	10
3.3	差測光	12

3.4	大気減光の補正	13
3.5	2019年12月18日のHAT-P-20bのトランジット ..	15
第4章	系外惑星トランジットの同定	18
4.1	XO-2bのトランジット	19
4.1.1	トランジット時刻のズレ	20
4.1.2	トランジット継続時間	21
4.1.3	減光	22
4.1	HAT-P-20bのトランジット	23
4.1.1	トランジット時刻のズレ	24
4.1.2	トランジット継続時間	25
4.1.3	減光	26
第5章	まとめ	27

第1章 序章

1.1 系外惑星トランジット

系外惑星とは、太陽以外の星の周りを公転する惑星のことである。公転する惑星が中心星の前を通過することをトランジットという。トランジットが起るとき、惑星が中心星の一部を隠すため、観測者から見た中心星の明るさは一時的に減少する。星の明るさが減少することを減光という。

トランジットによる中心星の減光は、中心星の大きさと惑星の大きさによって決まる。そのため、減光の大きさを測定することで、中心星に対する系外惑星の大きさを測ることができる。また、ライトカーブの形を見ることで、系外惑星の公転に関する情報を得ることができる。

1.2 研究概要

本研究は、岡山大学天文台で系外惑星トランジットを観測し、得られたデータからトランジットの時刻や減光の大きさを推定した。また、結果を先行研究と比較することで、観測の信頼性を評価するとともに、岡山大学天文台における系外惑星トランジット観測の可能性について検討した。

第 2 章 観測

2.1 観測

観測は、岡山大学天文台(東経 133° 55' 21.4, 北緯 34° 41' 19.1)で行った。

観測の計画は、『ETD(Exoplanet Transit Database)』[1, 2]を用いて立案した。

ETD[1, 2]には、トランジットを起こす既知の系外惑星について、トランジット時刻の予報、中心星の明るさ、減光の大きさといった情報が掲載されている。

ETD[1, 2]を用いて、岡山大学天文台で観測可能な系外惑星トランジットのイベントを2019年11月から12月の期間について検索し、その中から条件の良いものを選択した。2019年12月に8夜の観測を計画し、そのうち、天候に恵まれた2019年12月7日、12日、18日の計3夜に観測を行った。観測した3夜のうち、2019年12月7日は望遠鏡の調整に失敗し、ターゲット星が視野の外に出てしまった。そのため、系外惑星トランジットのデータを取得できたのは、2019年12月12日と18日の計2夜である。

2.2 観測機材

望遠鏡は口径 356 (mm)、焦点距離 2845 (mm) の MEADE LX600-35F8ACF を用いた(図 2.1)。

検出器は CMOS カメラ QHY174M-GPS を用いた(図 2.2)。



図 2.1 望遠鏡.



図 2.2 CMOS カメラ.

2.3 観測手順

観測は、ETD[1, 2]で予報されたトランジット開始時刻 30 分以上前から、終了時刻の 30 分以上後まで行った。

それぞれのトランジットを観測した後、補正に必要なダーク画像とフラット画像を撮像した。各夜の観測で得たデータを表 2.1 と表 2.2 にまとめる。いずれの観測もフィルターは使用していない。

Object	検出器温度 (°C)	露出時間 (秒)	撮像枚数 (枚)
XO-2b	-25.0	10	1129
ダーク	-25.0	10	11
フラット	-25.0	5	33
ダーク	-25.0	5	11

表 2.1 2019 年 12 月 12 日の観測記録

Object	検出器温度 (°C)	露出時間 (秒)	枚数 (枚)
HAT-P-20b	-25.0	10	776
ダーク	-25.0	10	11
フラット	-25.0	0.5	33
ダーク	-25.0	0.5	11

表 2.2 2019 年 12 月 18 日の観測記録

第3章 解析

3.1 一次処理

撮像したすべて画像(星をうつした画像)に、一次処理としてダーク引きとフラット割りを行った。一次処理には Makali i を使用し、その使い方は『2019年度 天文学入門』[3]を参考にした。

図 3.1 は X0-2b によるトランジットを観測して得られた画像に一次処理を施した画像で、図 3.2 は HAT-P-20b によるトランジットを観測して得られた画像に一次処理を施した画像である。

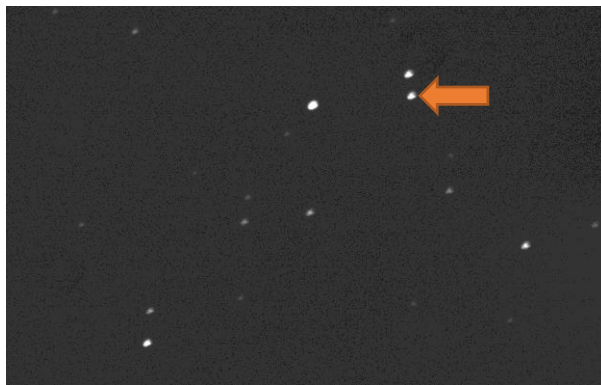


図 3.1 2019年12月12日に撮像した画像に一次処理を施した画像。
矢印が指しているのは、中心星である X0-2.

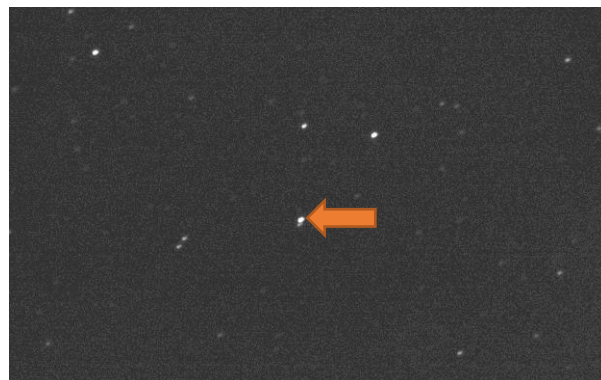


図 3.2 2019年12月18日に撮像した画像に一次処理を施した画像。
矢印が指しているのは、中心星である HAT-P-20.

3.1.1 ダーク引き

ダーク(暗電流)とは, カメラに光が入らないように撮像しても発生する, 検出器自身からわき出る電子のことである. カメラに光を入れずに撮像した画像をダークフレームという.

観測対象を撮像したオブジェクトフレームから, オブジェクトフレームと同一の条件で撮像したダークフレームを引くことで, ダークを除く. この作業をダーク引きという.

ダークフレームは複数枚を取得して, それらの中央値からマスターダークフレームを合成する. マスターダークフレームを使用することで, ゆらぎの影響を軽減することができる. マスターダークの合成には Fiji を用いた. 図 3.3 は X0-2b のオブジェクトフレーム用のダーク 11 枚, 図 3.4 は HAT-P-20b のオブジェクトフレーム用のダーク 11 枚を用いて作成したマスターダークフレームである.

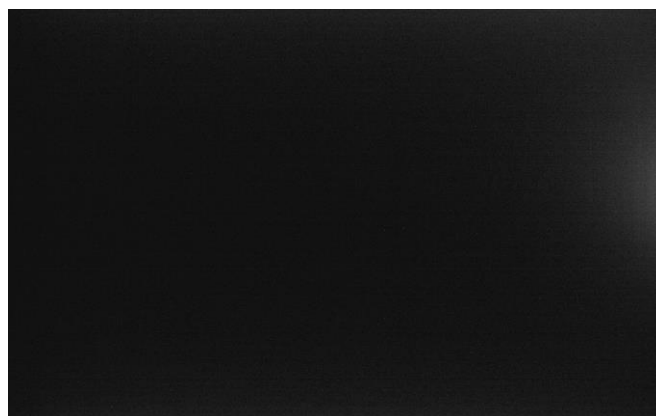


図 3.3 X0-2b のオブジェクトフレーム用のマスターダークフレーム.

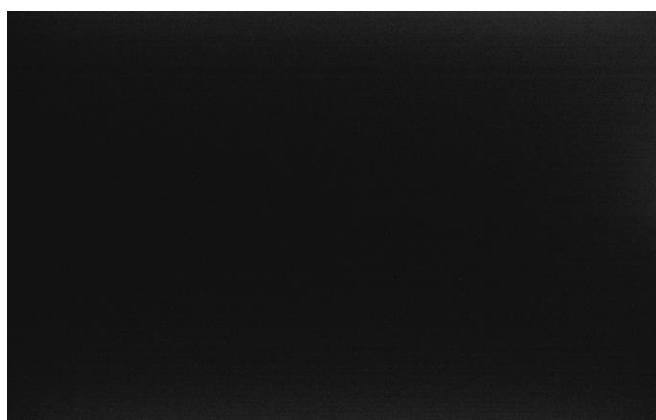


図 3.4 HAT-P-20b のオブジェクトフレーム用のマスターダークフレーム.

3.1.2 フラット割り

各検出器の感度ムラを補正するためにフラット割りを行う。明るさが一様な対象を撮像した画像をフラットフレームと呼び、フラット割りはオブジェクトフレームをフラットフレームで割り算することである。

フラットフレームも、複数枚を取得して、マスターフラットフレームを合成する。各フラットフレームは、フラットフレーム用に作成したマスターダークフレームを引き(ダーク引き)、各フレームの平均輝度が同じになるように規格化してから、各ピクセルについて中央値をとってマスターフラットフレームを合成する。一連の作業にはFijiを用いた。図3.5は2019年12月12日に取得したフラット画像33枚、図3.6は2019年12月18日に取得したフラット画像33枚を用いて作成したマスターフラットフレームである。

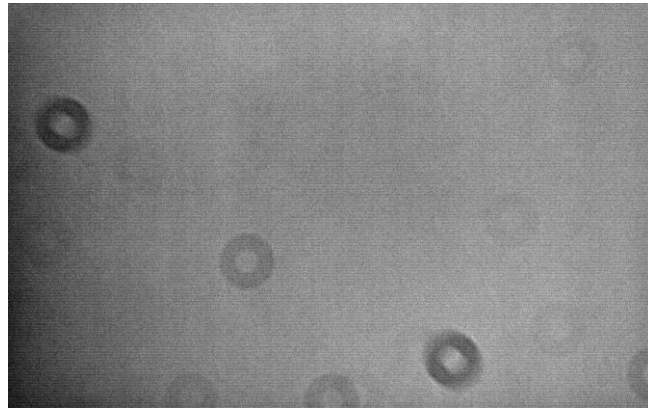


図 3.5 2019年12月12日のマスターフラットフレーム.

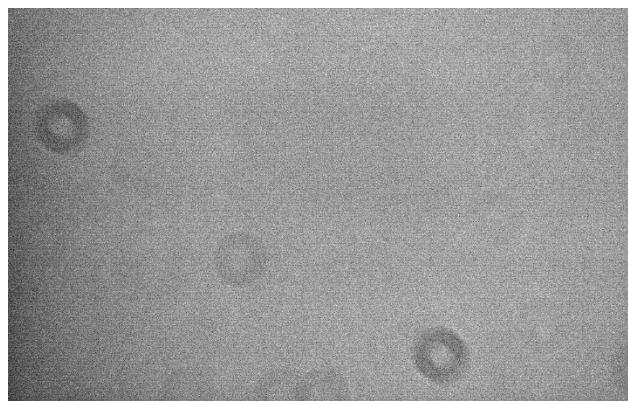


図 3.6 2019年12月18日のマスターフラットフレーム.

3.2 測光

測光とは、星の明るさを測ることである。星のほかに空も光を出しているため、測光では空の明るさを引く必要がある。

測光には AstroImageJ (Collins et al., 2017) を用いた。表 3.11 は測光で使用したパラメタである。Source_Rad (base) は星の明るさを測る範囲、Sky_Rad (min) と Sky_Rad (max) はそれぞれ空の明るさを測る領域の内側と外側の境界で、星の中心からの距離 (ピクセル) である。これらの値は AstroImageJ の推奨値を用いた。AstroImageJ は、ゲインや読み出しノイズを設定すると自動的に測光誤差も計算してくれるが、今回はそれらの設定を省略した (表 3.2)。観測された明るさから空の明るさを引いた星本来の明るさは、Source_Sky に出力される。

表 3.1 画像の測光に用いた数値

観測日	Source_Rad (base)	Sky_Rad (min)	Sky_Rad (max)
2019 年 12 月 12 日	22	39	59
2019 年 12 月 18 日	25	39	59

表 3.2 AstroImageJ 設定値

CCD gain	CCD readout noise	CCD dark current per sec
1.00	0.00	0.00

図 3.7 と図 3.8 は 2019 年 12 月 12 日に観測した X0-2 のライトカーブと比較星アンサンブル (比較星の明るさの和) のライトカーブである。縦軸は機械等級である。横軸は時刻で、左端は 2019 年 12 月 12 日の 22 時、右端は翌日 13 日の 3 時である。図 3.9 は X0-2 と比較星を示した画像である。

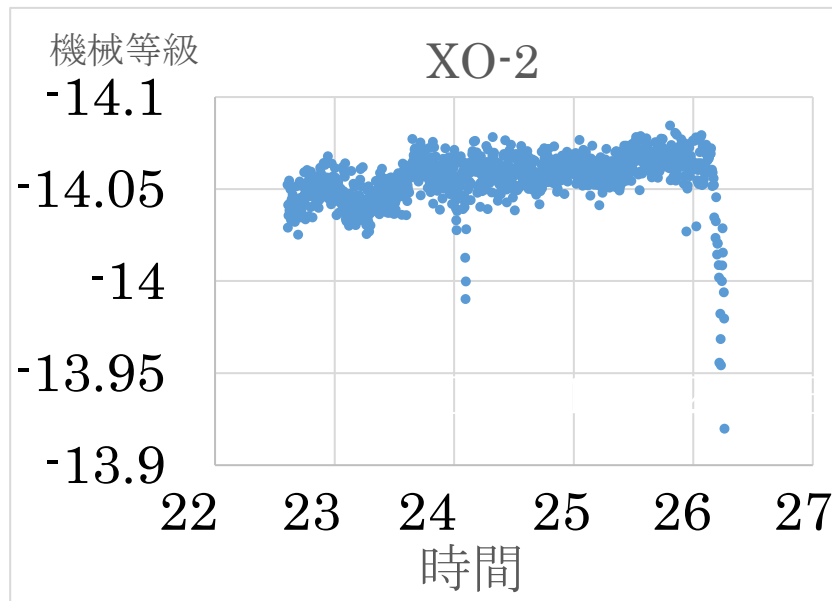


図 3.7 XO-2 のライトカーブ.

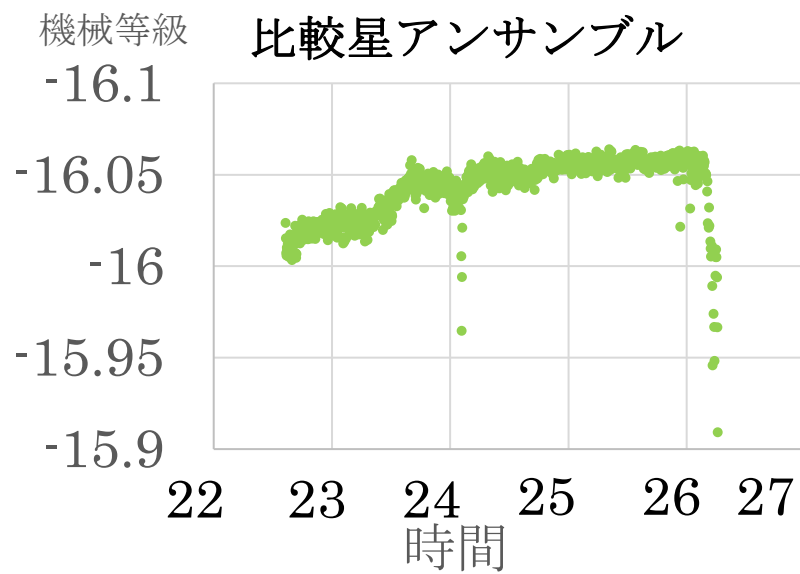


図 3.8 比較星アンサンブルのライトカーブ.

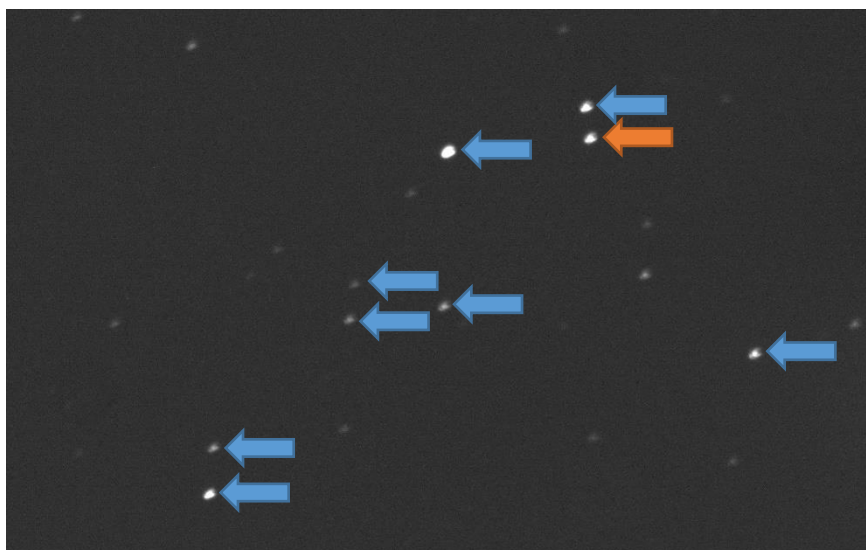


図 3.9 XO-2 と比較星.

XO-2 は赤矢印，比較星は青矢印で示している。

3.3 差測光

星の光が地球大気を通過するときに，星の光が大気によって吸収・屈折・散乱されることを大気減光という。大気減光の大きさは，大気の状態の変化や星の光が通過する大気量によって変化する。

図 3.7 と図 3.8 は，どちらも全体として時間とともに星の明るさが増している。これは，観測中に対象天体の地平高度が変化したことによる。この観測では，観測開始時に対象天体は地平高度 50 度付近にあったが，観測終了時には地平高度 70 度まで上がった。

また，24 時過ぎと 26 時過ぎに明るさがスパイク状に変化している。観測日はだいたい晴れていたが，24 時過ぎと 26 時過ぎはちょうど薄雲が出ていたことから，この明るさの減少は雲のせいであると考えられる。

大きな明るさの変化とは別に，短い時間でスケールでの明るさの変動が見られる。図 3.7 だと，およそ 0.02 等級ほどの変動がある。0.02 等級の変化はおよそ 2% の変化に対応する。これは大気の状態が，観測中に変化したことによるものと考えられる。

大気減光の影響を補正するため，差測光を行った。差測光とは，対象とする星の明るさを，同一フレーム内の星の明るさを基準にして測ることである。基準にする星のことを比較星という。対象の星と比較星が大気によって同じように減光しているなら，差測光をすることで大気の影響を除くことができる。

図 3.10 は差測光をした XO-2 のライトカーブである。縦軸は機械等級である。横軸は時

刻で、左端は2019年12月12日の22時、右端は翌日13日の3時である。ライトカーブは時間とともに右下がりになった。

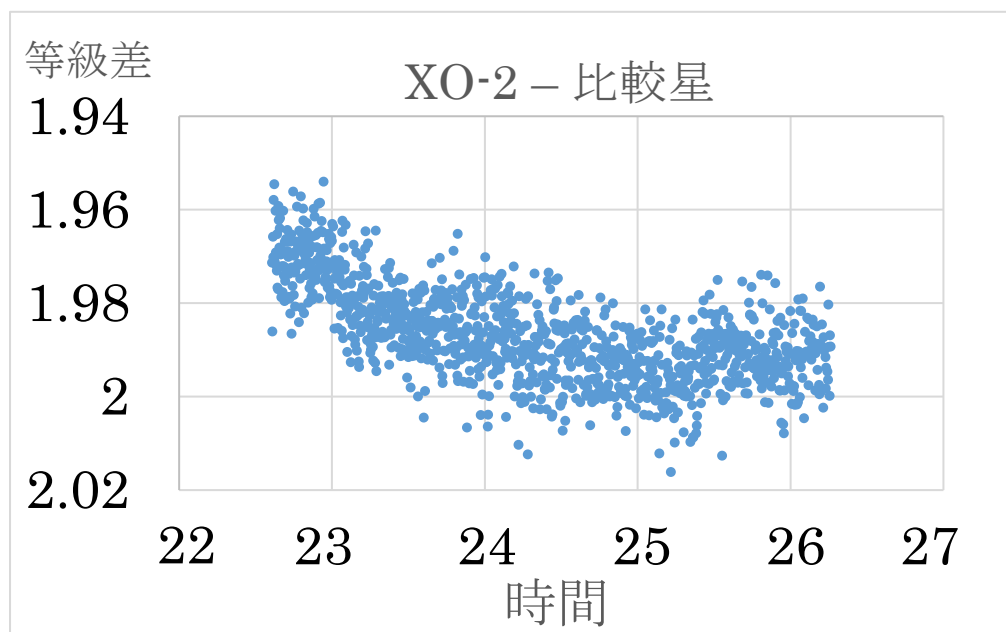


図 3.10 差測光で得られた XO-2 のライトカーブ。

3.4 大気減光の補正

差測光で大気の影響を取り除くことができるのは、対象とする星と比較星が大気によって同じように減光した場合である。減光の大きさは光の波長に依存する。そのため、対象とする星と比較星の色が異なる場合には、差測光で大気の影響を完全に除くことはできない。図 3.10 で星の明るさが時間とともに減少しているように見えるのは、対象とする星と比較星の色が異なることによるものである可能性が高い。なぜなら XO-2 は K dwarf に分類される星で、平均的な星よりも赤い星である。比較星が XO-2 に比べて青い星であったなら、比較星と XO-2 で大気減光の大きさは同じにならない。大気減光の大きさは地平高度にも依存する。観測中に天体の高度は上がったので、高度が低かった観測直後に比較星は相対的に減光が大きく、高度が上がるとともに減光の差は小さくなっていったと考えられる。

本研究では、差測光で得られた星の明るさの時間変化は、時間の一次関数であると仮定して、明るさの補正をおこなった。図 3.11 は、トランジット中のデータを除いた XO-2 のライトカーブである。ここから明るさの時間変化を表す一次式の係数を求めた。図 3.12 は、一次式で補正した XO-2 のライトカーブである。

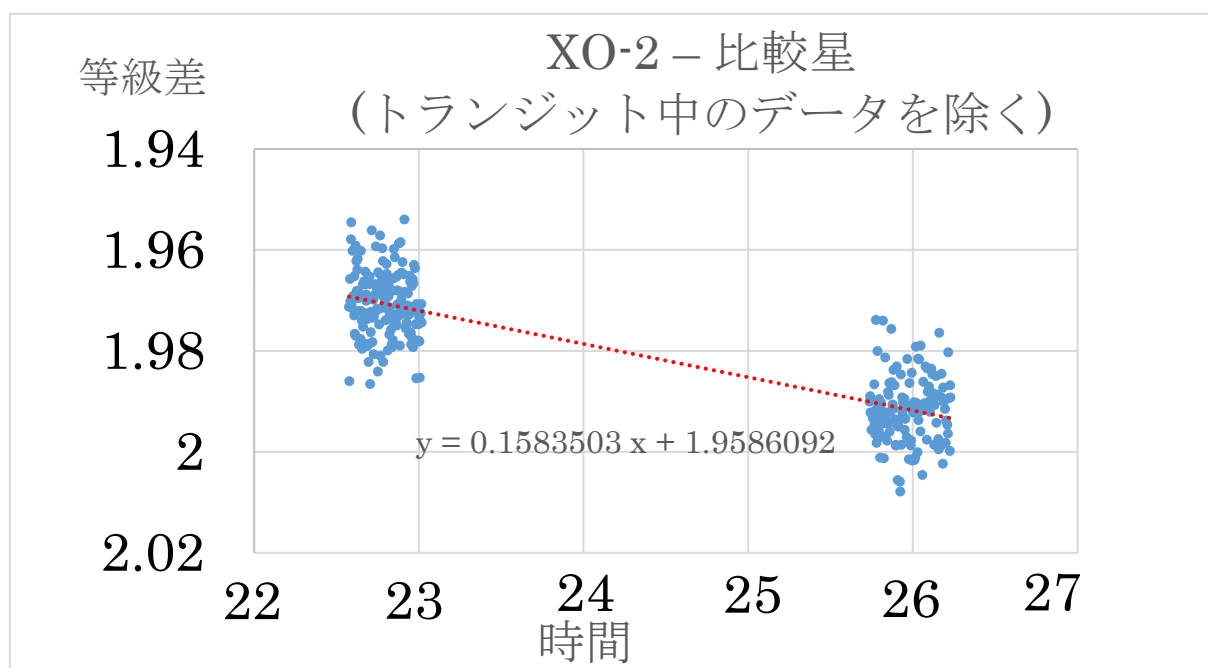


図 3.11 トランジット中のデータを除いたライトカーブ.

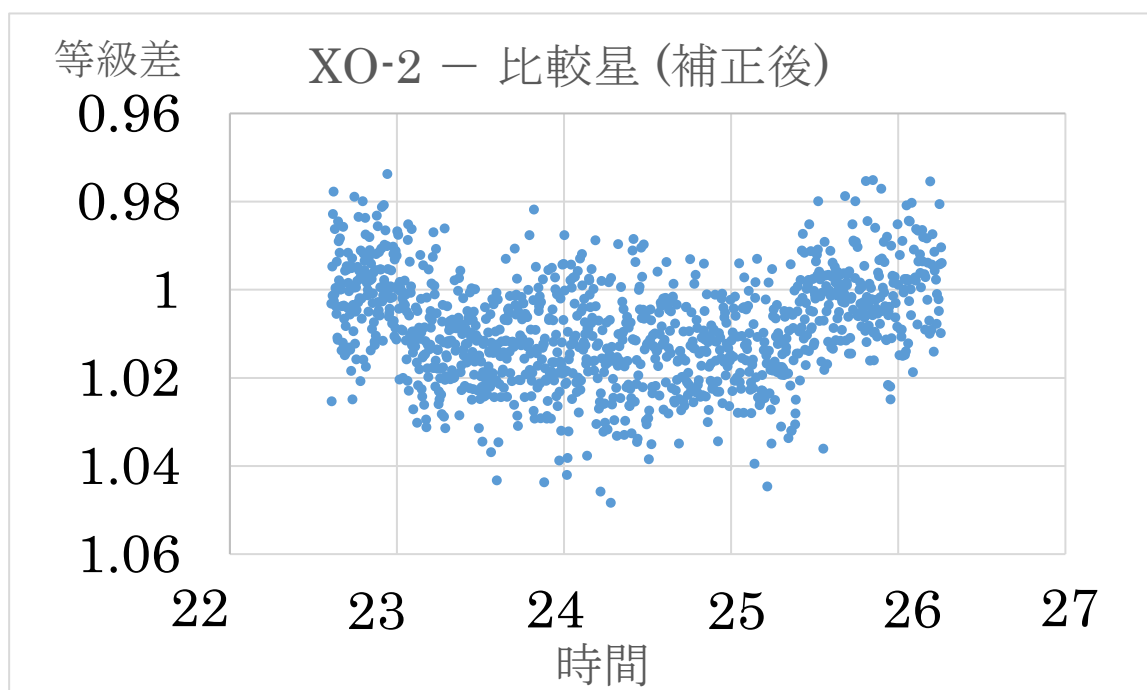


図 3.12 一次式を用いて補正した XO-2 のライトカーブ.

3.5 2019年12月18日のHAT-P-20b トランジット

2019年12月18日に観測したHAT-P-20b トランジットも、XO-2bと同様の手順で解析した。

図3.13と図3.14は2019年12月18日に観測したHAT-P-20のライトカーブと比較星アンサンブル(比較星の明るさの和)のライトカーブである。縦軸は機械等級である。横軸は時刻で、左端は2019年12月18日の21時、右端は翌日19日の1時である。図3.15はXO-2と比較星を示した画像である。図3.16は差測光したHAT-P-20のライトカーブである。HAT-P-20を測光する際、近傍の星とHAT-P-20を分けて測光することが難しかったため、まとめて測光した。図3.17は、トランジット中のデータを除いた、HAT-P-20のライトカーブである。これより明るさの時間変化を表す一次式の係数を求めた。図3.18は一次式で補正したHAT-P-20のライトカーブである。

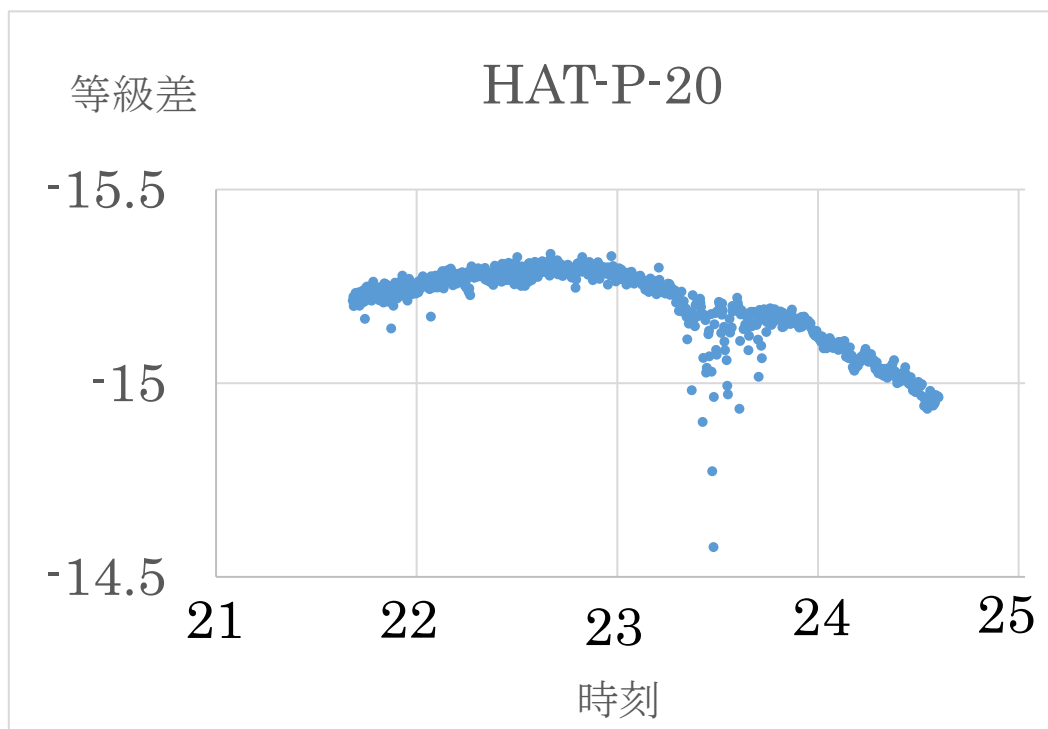


図3.13 HAT-P-20のライトカーブ。

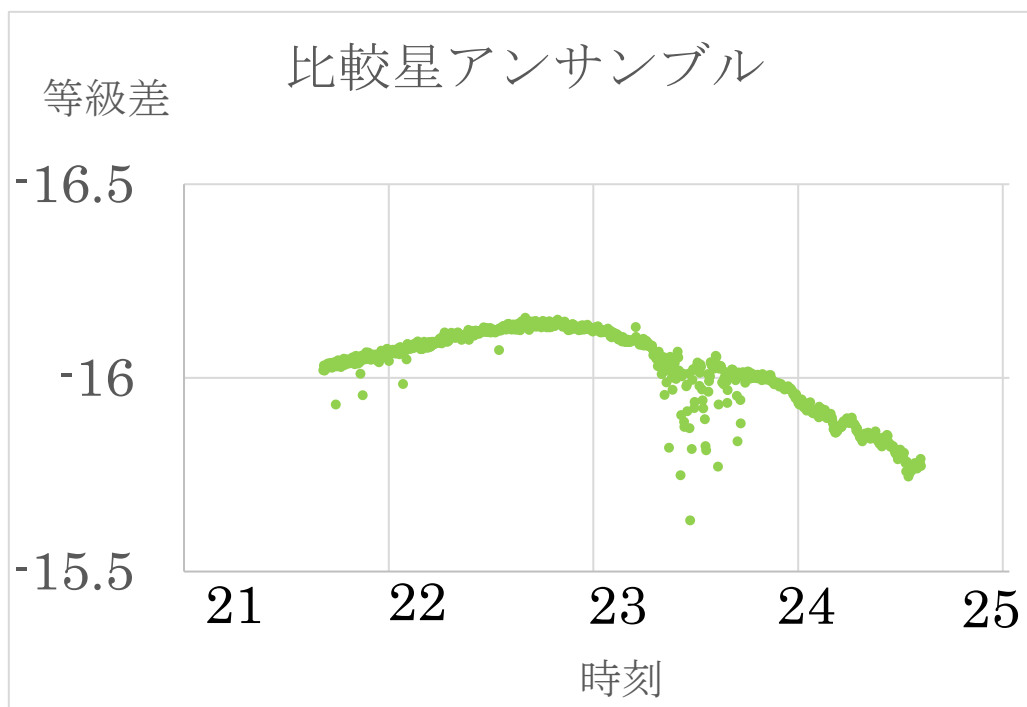


図 3.14 比較星アンサンブルのライトカーブ.

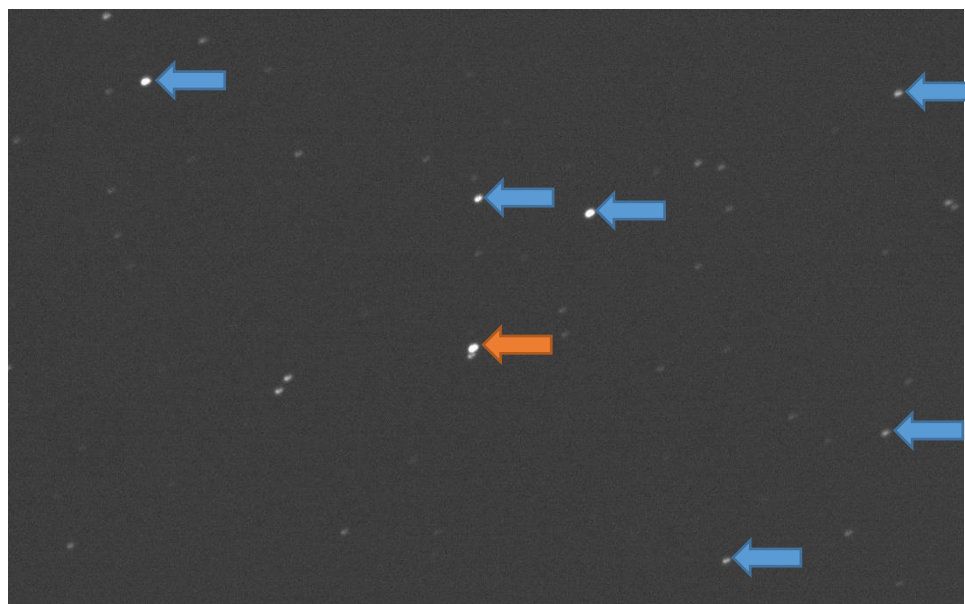


図 3.15 HAT-P-20 と比較星.

X0-2 は赤矢印, 比較星は青矢印で示している.

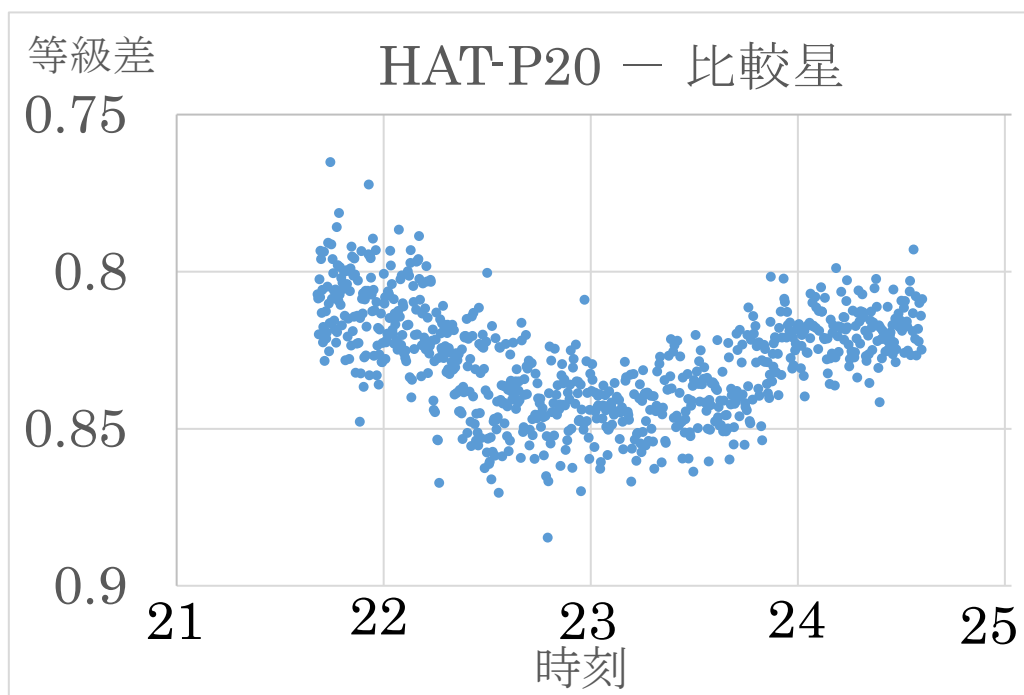


図 3.16 差測光した HAT-P-20 のライトカーブ.

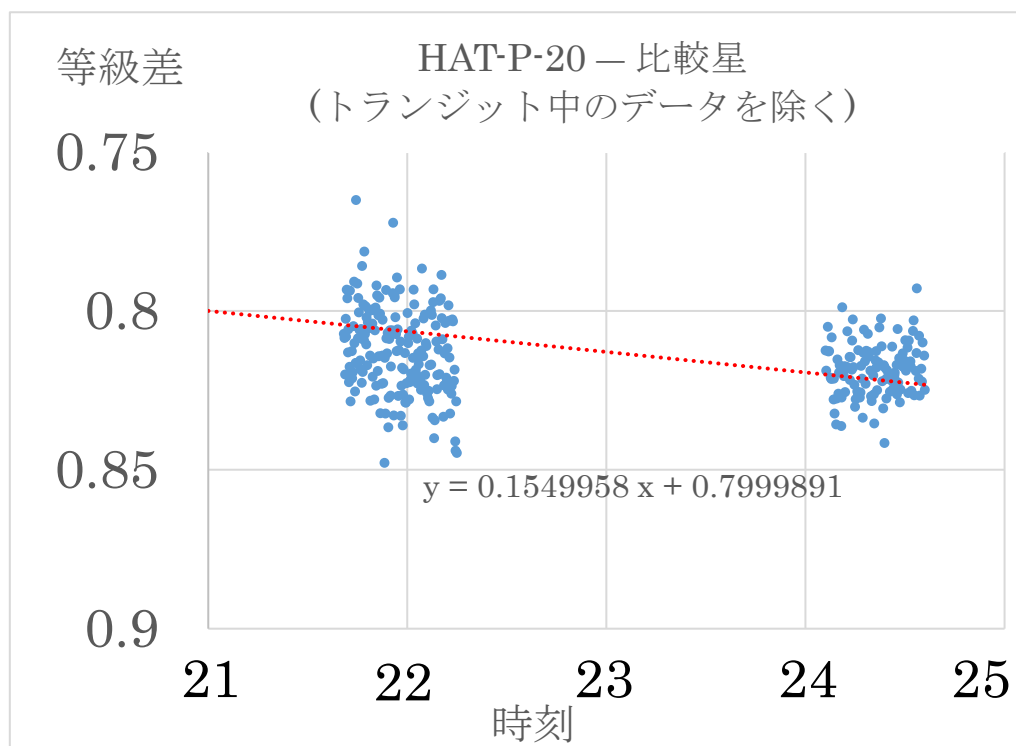


図 3.17 トランジット中のデータを除いたライトカーブ.

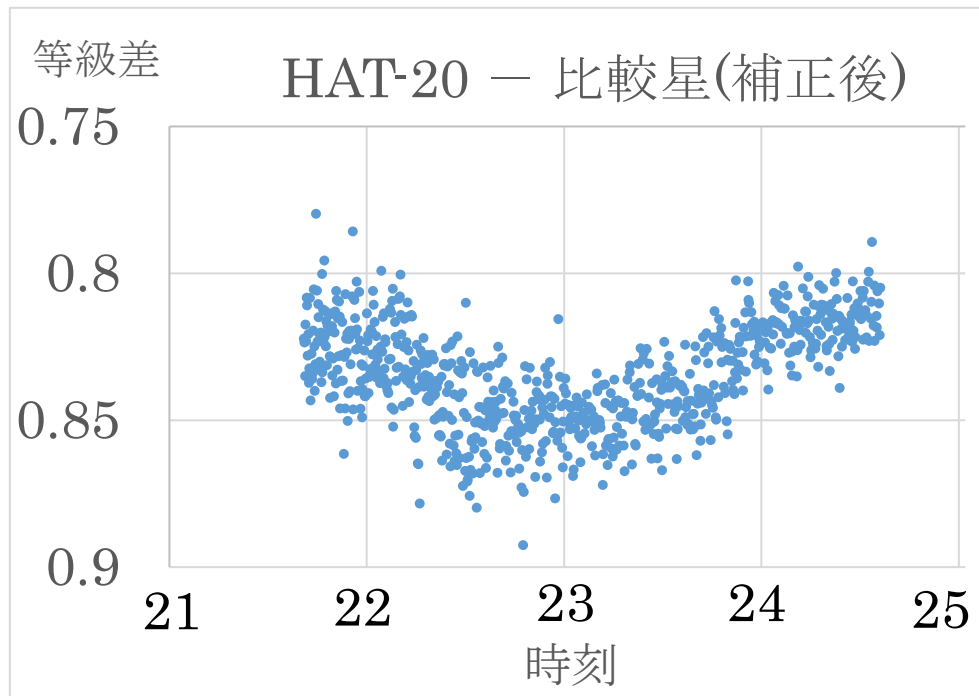


図 3.18 一次式を用いて補正した HAT-P-20 のライトカーブ.

第4章 系外惑星トランジットの同定

4.1 X0-2b トランジット

図4.1は2019年12月12日に観測した、系外惑星X0-2bによるトランジットのライトカーブである。青い点は10秒の露出時間で取得した、各画像を測光した結果である。大気の短周期の影響を取り除くため、データを6個ずつまとめて、その平均をとったものを橙でプロットした。赤色の縦線はETD[1, 2]が予報したトランジットの開始時刻と終了時刻である。黒色の縦線は、橙のプロットを見て、推定したトランジット開始時刻と終了時刻である。表4.1はETD[1, 2]による予報と本研究の観測で決めた値を比較した表である。ETD[1, 2]の予報ではトランジット時刻は23時3分から25時45分まで、継続時間は162分、減光は0.0124等級とされているのに対し、図4.1の移動平均から推定したトランジット時刻は22時57分から25時33分まで、継続時間は156分、減光は0.0138等級である。トランジット開始・終了時刻は予報よりも早い時刻であった。トランジット終了時刻は予報より12分早い、原因は不明である。減光はおおむね予報どおりであった。

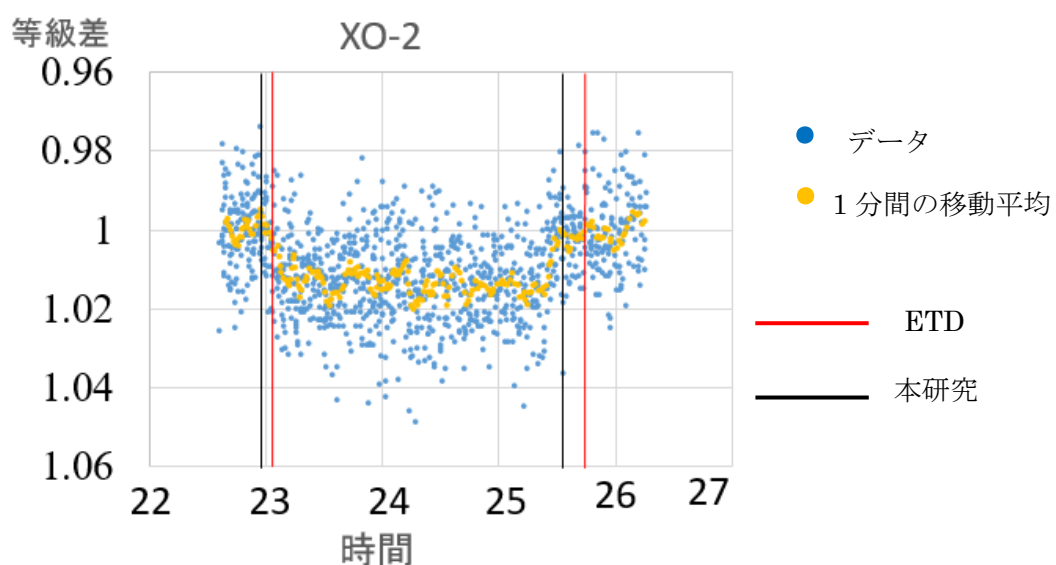


図4.1 系外惑星X0-2bによるトランジットのライトカーブ。

表 4.1 2019 年 12 月 12 日の X0-2b トランジット

	トランジット開始-終了時刻	継続時間	減光(等級)
ETD の予報	23:03 - 25:45	162min	0.0124
本研究	22:57 - 25:33	156min	0.0138

4.1.1 トランジット時刻のズレ

図 4.2 は X0-2b のトランジット時刻のズレを表している。縦軸は観測されたトランジット時刻の中心時刻と予報の差で、単位は日である。ひと目盛りである 0.01 日は 14.4 分である。横軸は、ある基準日から数えて、惑星(X0-2b)が中心星(X0-2)の周りをまわった回数 E である。X0-2b の公転周期は 2.61586178 日として、修正ユリウス日 M と E の関係は

$$M = 54466.88454 + 2.61586178E$$

で与えられる。修正ユリウス日の計算には『ユリウス日 - 国立天文台暦計算室』[4]を用いた。観測日である 2019 年 12 月 12 日は E = 1667 になる。赤は ETD[1, 2]が収集した観測結果、緑は本研究の結果である。本研究は ETD[1, 2]の予報よりも 9 分早くトランジットを観測した。トランジット時刻は全体的に右下がりになっていて、本研究の結果はその延長上にある。EPOCH の計算に使った X0-2b の公転周期は実際の公転周期よりも長いのかもしれない。

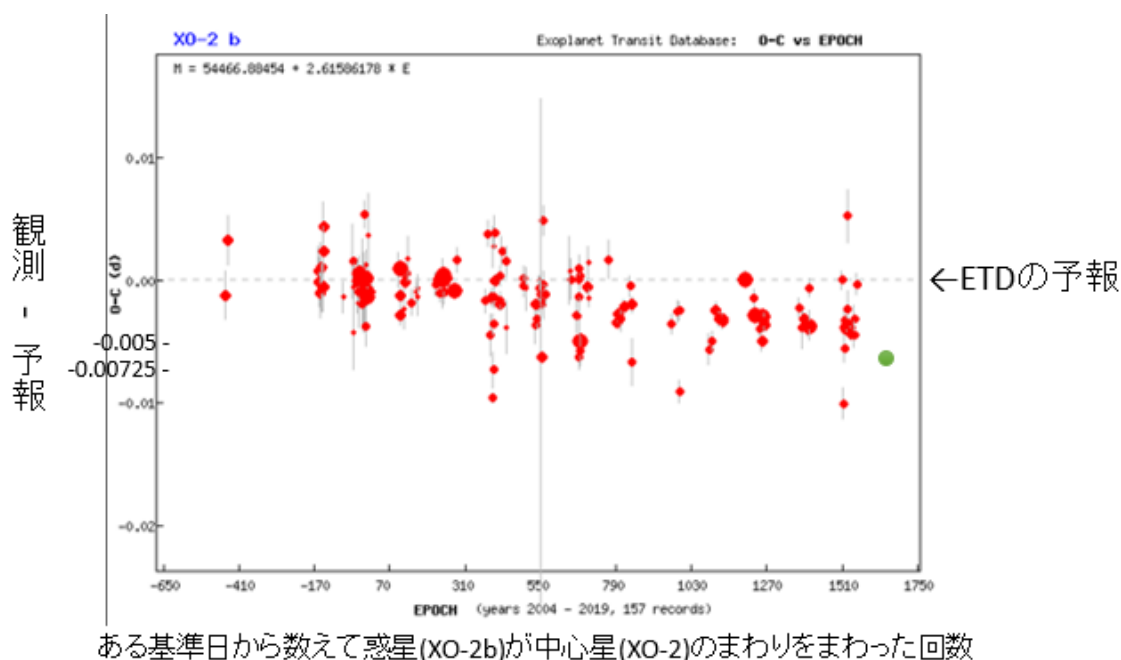


図 4.2 X0-2b トランジット時刻と予報時刻のズレ。
ETD[1, 2]に本研究の結果(緑)を加筆した。

4.1.2 トランジット継続時間

図 4.3 は XO-2b のトランジット継続時間の図である。縦軸はトランジット継続時間を表しており、単位は分である。横軸と凡例は図 4.2 と同じである。本研究で得られたトランジット継続時間は 156 分であり、ETD[1, 2]の予報よりも 6 分短かったが、他の観測のばらつき の範囲内に入っているように思える。

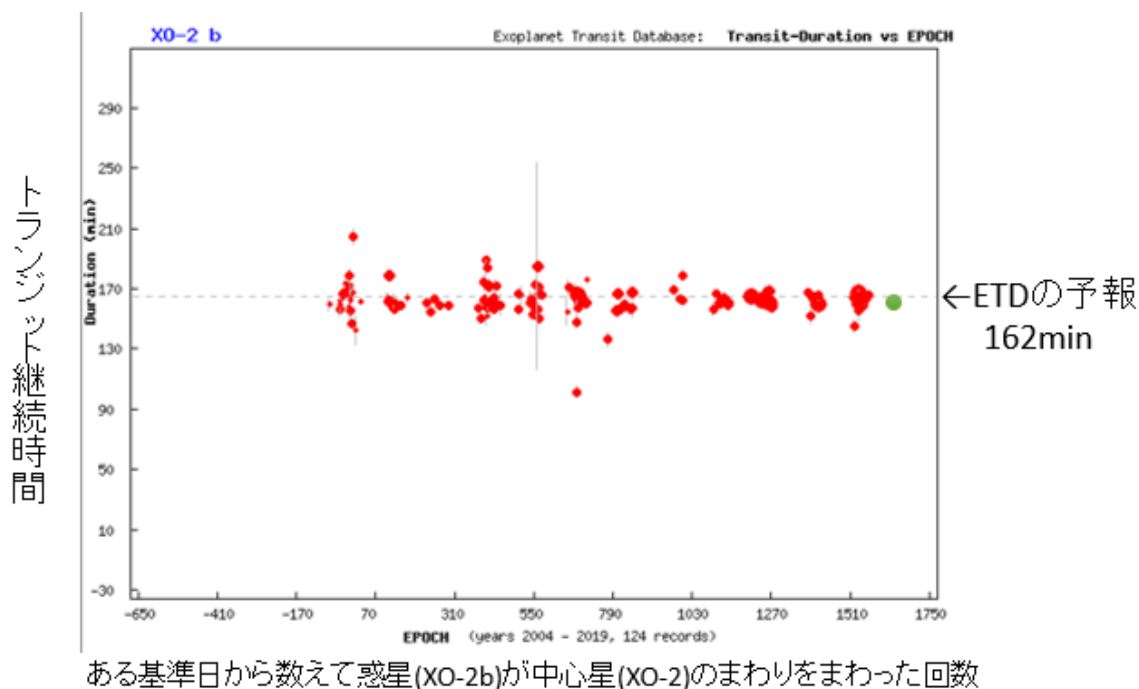
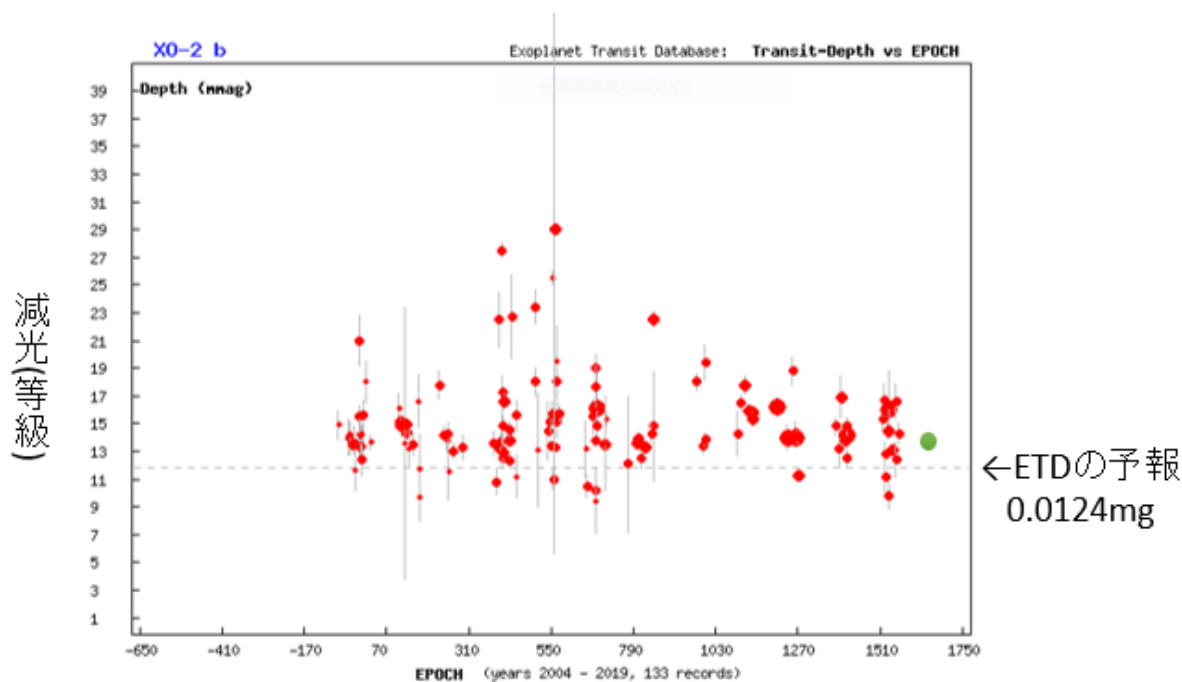


図 4.3 XO-2b のトランジット継続時間。
ETD[1, 2]の図に本研究の結果(緑)を加筆した。

4.1.3 減光

図 4.4 はトランジットによる減光の大きさを表した図である。縦軸は減光の大きさを等級で表しており、単位は mmag である。横軸と凡例は図 4.2 と同じである。本研究で推定した減光は 13.8mmag で、ETD[1, 2]の予報 12.4mmag より大きい。他の観測と同程度であり、トランジットによる減光を観測できたといえる。



ある基準日から数えて惑星(XO-2b)が中心星(XO-2)のまわりをまわった回数

図 4.4 XO-2b トランジットの減光.
ETD[1, 2]の図に本研究の結果(緑)を加筆した.

4.2 HAT-P-20b トランジット

図 4.5 は、2019 年 12 月 18 日に観測した HAT-P-20b によるトランジットのライトカーブである。凡例は図 4.1 と同じである。表 4.2 は ETD[1, 2] による予報と本研究の観測で決めた値を比較した表である。ETD[1, 2] の予報ではトランジット時刻は 22 時 15 分から 24 時 5 分まで、継続時間は 110 分、減光は 0.0204 等級とされているのに対し、図 4.2 の移動平均から推定したトランジット時刻は 22 時 11 分から 24 時 0 分まで、継続時間は 109 分、減光は 0.0273 等級である。トランジット開始・終了時刻は、予報よりも早い時刻であったが、継続時間は予報と大きく異なっていない。減光は予報よりも大きくなった。

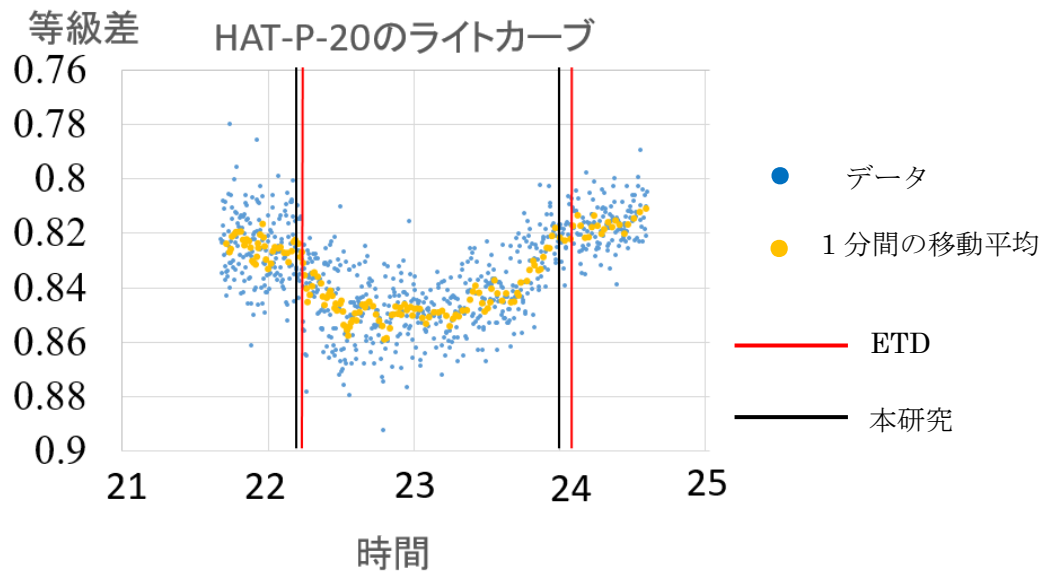


図 4.5 HAT-P-20b によるトランジットのライトカーブ。

表 4.2 2019 年 12 月 18 日 HAT-P-20b によるトランジットについて、
ETD の予報と本研究の結果

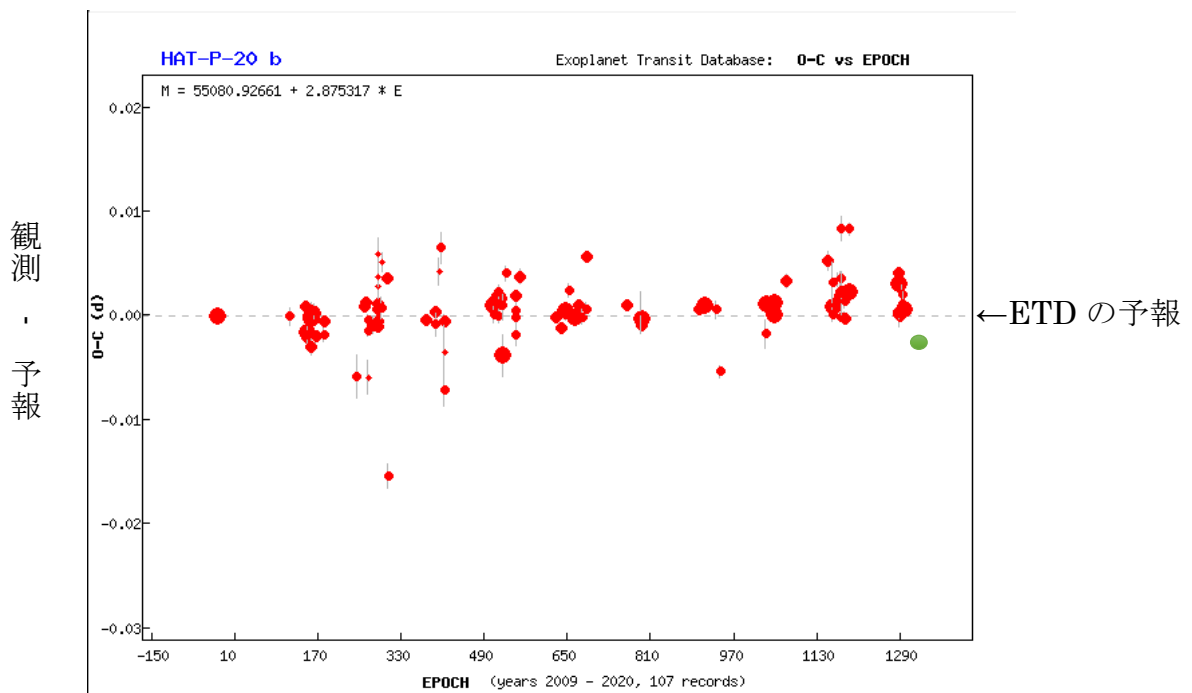
	トランジット開始-終了時刻	継続時間	減光(等級)
ETD の予報	22:15 - 24:05	110min	0.0204
本研究	22:11 - 24:00	109min	0.0273

4.2.1 トランジット時刻のズレ

図 4.6 は HAT-P-20b のトランジット時刻のズレを表している。縦軸は観測されたトランジット時刻の中心時刻と予報の差で、単位は日である。ひと目盛りである 0.01 日は 14.4 分である。横軸は、ある基準日から数えて、惑星(HAT-P-20b)が中心星(HAT-P-20)の周りをまわった回数 E である。HAT-P-20b の公転周期は 2.87531 日として、修正ユリウス日 M との関係は

$$M = 55080.92661 + 2.875317E$$

で与えられる。修正ユリウス日の計算には『ユリウス日 - 国立天文台暦計算室』[4]を用いた。観測日である 2019 年 12 月 18 日は E = 1306 になる。赤は ETD[1, 2]が収集した観測結果、緑は本研究の結果である。本研究は ETD[1, 2]の予報よりも 4.5 分早くトランジットを観測した。本研究の結果は、これまでの観測に比べると少し早い時刻にトランジットを観測しているようにも見えるが、ばらつきの範囲内であるようにも見える。

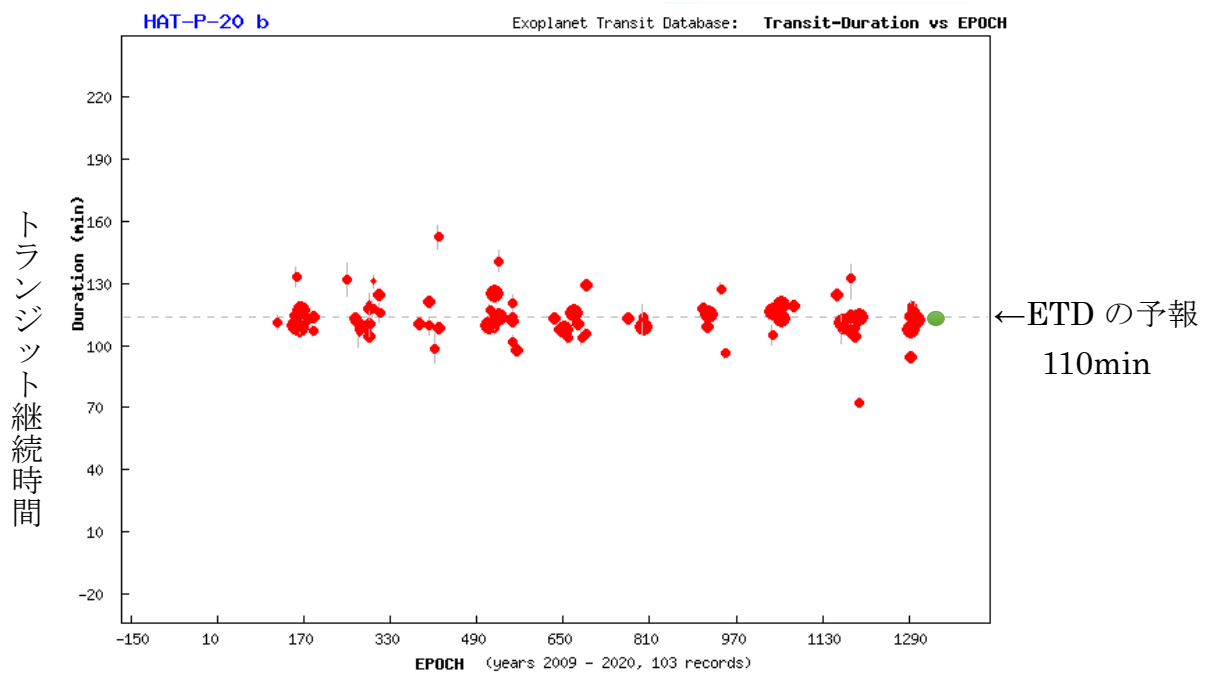


ある基準日から数えて惑星(HAT-P-20b)が中心星(HAT-P-20)のまわりをまわった回数

図 4.6 HAT-P-20b トランジット時刻と予報時刻のズレ。
ETD[1, 2]の図に本研究の結果(緑)を加筆した。

4.2.2 トランジット継続時間

図 4.7 は HAT-P-20b のトランジット継続時間の図である。縦軸はトランジット継続時間を表しており、単位は分である。横軸と凡例は図 4.6 と同じである。本研究で得られたトランジット継続時間は 109min であり、ETD[1, 2]の予報と同程度である。先行研究と比較しても整合的である。

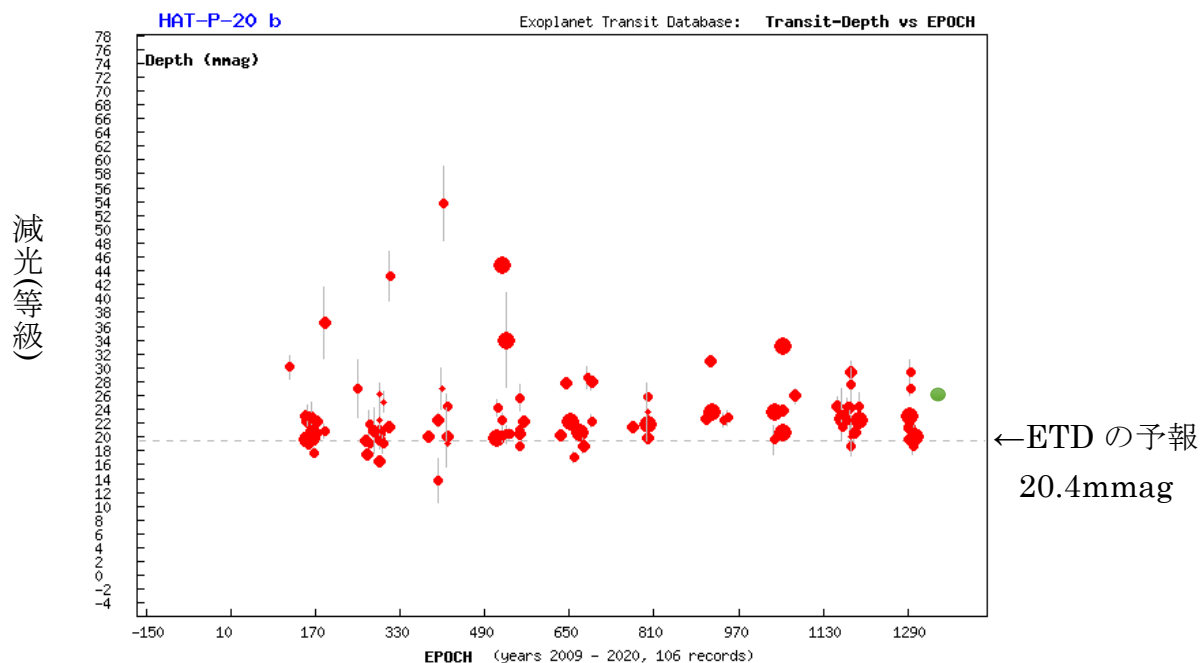


ある基準日から数えて惑星(HAT-P-20b)が中心星(HAT-P-20)のまわりをまわった回数

図 4.7 HAT-P-20b のトランジット継続時間。
ETD[1, 2]の図に本研究の結果(緑)を加筆した。

4.2.3 減光

図 4.8 は HAT-P-20b のトランジットによる減光の大きさを表した図である。縦軸は減光の大きさを等級で表しており、単位は mmag である。横軸と凡例は図 4.6 と同じである。本研究で推定した減光は ETD[1, 2]の予報よりも大きいが、これまでにおこなわれた他の観測とほぼ同等である。



ある基準日から数えて惑星(HAT-P-20b)が中心星(HAT-P-20)のまわりをまわった回数

図 4.8 HAT-P-20b のトランジットの減光.

ETD[1, 2]の図に本研究の結果(緑)を加筆した。0.0273mg は 27.3mmag である。

第5章 まとめ

岡山大学天文台の望遠鏡を用いて系外惑星トランジットの観測を3夜行い、うち2019年12月12日と18日について、ライトカーブを作成することのできるデータを取得した。

取得したデータは一次処理を行った後、AstroImageJを用いて開口測光をおこなった。対象とする星の周囲にあった星を用いて差測光をおこなった後、残った星の明るさの変化は時間の一次関数と仮定して補正した。

観測結果から、トランジット開始時刻、終了時刻、減光率を推定した。先行研究との比較から、岡山大学天文台で系外惑星トランジットを観測することは可能であることが分かった。

謝辞

本研究を行うにあたり、ご指導いただきました指導教員である はしもとじょーじ 准教授に心より感謝いたします。

同研究室の先輩方には、研究を行う上で相談に乗っていただきました。ありがとうございました。同期の皆さまには様々な面で支えていただきました。ありがとうございました。

参考文献

[1] Exoplanet Transit Database , [http://var2.astro.cz/ETD/] (2020. 2. 13 最終アクセス日)

[2] Poddany S., Brat L., Pejcha O. (2010) Exoplanet Transit Database. Reduction and processing of the photometric data of exoplanet transits *New Astronomy* 15, 297–301. (arXiv:0909.2548v1)

[3] 岡山大学, 2019年度 天文学入門 , [https://epa.desc.okayama-u.ac.jp/~astro/astro101/2019/] (2020. 2. 12 最終アクセス日)

[4] 国立天文台, ユリウス日 - 国立天文台暦計算室, [https://eco.mtk.nao.ac.jp/cgi-bin/koyomi/cande/date2jd.cgi] (2020. 1. 23 最終アクセス日)