

地上望遠鏡で探る タイタン大気の時間変動

中嶋 瑞穂

学籍番号：02200389

＊ ＊ ＊ ＊ ＊

北海道大学 理学部地球惑星科学科
惑星宇宙グループ 探査観測ユニット

指導教員：高木 聖子 講師

＊ ＊ ＊ ＊ ＊

2024年2月25日

要旨

土星第 6 衛星のタイタンは最大の土星衛星であり、太陽系で 2 番目に大きな衛星である。厚い大気を持ち、気圧は地表で約 1.5 気圧に達する。大気の組成は窒素が 90 % 以上を占め、メタンは高度により異なるが 1-5 % を占める。タイタンの大気は地球と同様に、熱圏、中間圏、成層圏、対流圏の層構造を持ち、成層圏にあるヘイズ層は光学的に厚く地表の観測を拒んでいる。中間圏から熱圏ではメタンが高エネルギー粒子により電離し、太陽光により光分解される。電離、解離したメタンはヘイズ層を構成するソリン (高分子有機物) を生成するプロセスを進む。

タイタン大気の時間変動は

1. 長時間スケールの時間変動: 土星公転運動 (約 30 年周期) に起因する季節変動
2. 太陽周期活動 (約 11 年周期) に起因する変動
3. 短時間スケールの時間変動: タイタン公転運動 (約 16 日周期) に起因する変動と対流圏の活動

の 3 種類が知られている。土星とタイタンの赤道傾斜角と土星の公転運動により、タイタンは約 30 年周期の季節変動が生じている。具体的には成層圏の温度・組成変化 [Vinatier et al., 2015], ヘイズ層の南北非対称性の変化 [Lorenz et al., 1997], ヘイズ層の一部の高度変化 [West et al., 2011; Koskinen et al., 2011], 対流圏の雲の変動 [Rodriguez et al., 2014] が知られている。太陽周期活動 (約 11 年周期) により太陽活動が活発になると熱圏のメタン濃度が低下する現象も観測されている [Westlake et al., 2014]。タイタンの公転軌道はプラズマ密度が大きい土星磁気圏のプラズマシートを出入りしている。Westlake et al. (2011), Snowden et al. (2013) はプラズマシートの内外でタイタン熱圏の温度が変動していることを発見した。対流圏の雲が運動は、地上望遠鏡によるモニタリング・キャンペーン [Roe et al., 2005; Schaller et al., 2006a; Schaller et al., 2006b; Ádámkovics et al., 2010] や Cassini 探査機 [Ádámkovics et al., 2010; Rodriguez et al., 2014] の観測により明らかになった。

太陽周期活動がメタン濃度に影響を及ぼすこと、タイタンの公転運動とプラズマ密度の変動が熱圏温度に影響を及ぼすことが知られている一方で、タイタン公転運動とメタン濃度の関係は明らかにされていない。対流圏雲のモニタリング・キャンペーンにおいては、メタン吸収の影響がない波長域で観測されたため、短時間スケールのメタン濃度変動を明らかにすることはできなかった。

本研究では北海道大学大学院理学研究院附属天文台のピリカ望遠鏡を用いてタイタンのメタン吸収波長 (619, 727, 889 nm) 前後の波長域を多波長観測し、メタン吸収波長におけるタイタンの反射率の変動を解析した。公転軌道上の複数地点における反射率を比較することで、公転により生じる変動を調査し、短時間スケールのメタン濃度の時間変動を明らかにする。ピリカ望遠鏡を用いた観測は 2023 年 9 月から 11 月にわたり 6 夜観測を実施した。2021 年の 1 夜、2022 年の 2 夜の観測結果も合わせて、合計 9 夜の反射率を解析した。

メタン吸収波長の反射率の大きさを評価するために 2 つの指標 RR(Reflectance Ratio), RDI(Reflectance Delta Index) を定義し解析した。解析の結果、タイタンの公転軌道要素に応じて RR, RDI が変動していた。メタン吸収波長の反射率は、近土点で大きく、遠土点で小さい傾向がある。この傾向から、タイタン大気は公転運動によりメタン吸収波長の反射率が周期的な短時間スケールの変動をする可能性が考えられる。

このような変動を生じるメカニズムとして

1. 太陽フラックスが減少することで光分解が低調になり相対的にメタン量が増加した。

2. 土星磁気圏の高エネルギー粒子により有機物が分解されメタンが増加した.
3. ディタッチドヘイズ層の高度が変動することによりメタン吸収波長の反射率が変動した.

の3つの仮説が考えられる.

本研究では仮説を検証するに至らず、また9夜の観測結果しか解析できなかった. 今後の研究課題として、モデルとの比較やさらなる観測に基づく検証が必要である.

目次

1	序論	4
1.1	タイタンの諸元	4
1.2	先行研究	5
1.2.1	長時間スケールの時間変動 (季節変動)	6
1.2.2	太陽周期活動による時間変動	10
1.2.3	短時間スケールの時間変動	10
1.3	研究目的	12
2	手法	15
2.1	観測手法	15
2.1.1	観測装置	15
2.1.2	観測手法	17
2.1.3	相対測光	17
2.1.4	観測結果	18
2.2	解析手法	18
2.2.1	一次処理	18
2.2.2	開口測光	19
2.2.3	反射率	19
2.2.4	RR 及び RDI	20
2.2.5	タイタンの軌道要素	22
3	結果	24
3.1	反射率	24
3.2	RR 及び RDI	30
4	議論	44
4.1	タイタン, 土星の位置関係及び土星磁気圏の形状	44
4.2	RR, RDI の変動メカニズムに関する仮説	45
4.2.1	メタンの経度分布	47
4.2.2	太陽フラックス	48
4.2.3	土星磁気圏	49
4.2.4	ヘイズの高度変化	50
5	結論	51

1 序論

1.1 タイタンの諸元

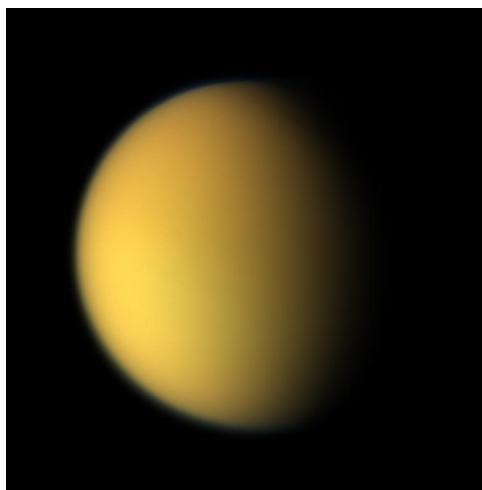


図 1.1 2005 年 4 月に Cassini 探査機が撮影したタイタン [Credit: NASA/JPL/Space Science Institute].

タイタンは最も大きい土星衛星であり、木星衛星ガニメデに次いで太陽系内で 2 番目に大きな衛星である。厚い大気、炭化水素の湖と砂漠、メタンによる気象現象が知られている。地表に液体を湛えている地球以外の唯一の太陽系内天体であり、地殻から大気にメタンを供給する氷火山の存在も推測されている。タイタン大気には地球と同様に対流圏・成層圏・中間圏・熱圏の層構造がある。対流圏ではメタンによる気象現象が生じており、成層圏には光学的に厚いヘイズ層が存在する。ヘイズ層の影響で成層圏より下を直接観測することは難しいが、Cassini 探査機及び Huygens probe 探査機の調査、赤外線域の望遠鏡観測により、対流圏の気象現象や大気組成、地表の様子が明らかにされてきた [Hörst, 2017].

表 1.1 はタイタンと太陽系の主要な衛星、惑星の諸元である。タイタンの赤道傾斜角は 0.6° であるが土星の赤道傾斜角 (26.73°) 及び土星の公転運動により、タイタンの 1 年 (29.5 年) を通した季節変動が生じる。タイタンは約 16 日周期で土星を公転しており、公転軌道の半径は 19.7 - 20.9 土星半径である。自転周期は公転周期と同期している。

表 1.1 タイタン, ガニメデ, 月, 地球, 土星の諸元. NASA Planetary Fact Sheet, NASA/JPL Horizons より作成.

	タイタン	ガニメデ	月	地球	土星
半径 [km]	2575	2634	1737	6371	60270
質量 [10^{24} kg]	0.1345	0.1482	0.07349	5.974	568.46
公転周期	15.945448日	7.155588日	27.322日	1年	29.447498年
平均公転半径	20.3 土星半径	7.71 木星半径	60.34 地球半径	1 AU	9.5 AU
赤道傾斜角 [度]	0.6	0.1	1.5424	23.4392911	26.73

タイタン大気の主成分は窒素 (N_2) であり、メタン (CH_4) と合わせて 99 % 以上を占める。窒素は大気の 90 % 以上を占め、メタンは高度により 1.31-5.65% の変動がある。地表での気圧は 1.5 bar に達し、スケールハイトは 15-50 km に達する厚い大気である。地球のスケールハイト (8.5 km) と比較し、タイタン大気が高層まで広がっていることがわかる。有効温度は 82 K であり、地球 (250 K) と比較して低温な大気である。タイタン地表はメタンの三重点近くの温度であるため、地球上の水と類したメタンの降水など気象現象が生じる。対流圏には南北方向のハドレー循環が、成層圏には東西方向のスーパーローテーションが存在する。

図 1.2 はタイタン大気の概念図である。黒線は Huygens probe 探査機がタイタン地表に着地するまでに観測した温度である。対流圏にはメタンの雲が存在する。成層圏にはメインヘイズ層とディタッチドヘイズ層の 2 つのヘイズ層がある。ディタッチドヘイズ層は季節により高度が変化する。また成層圏より上空では太陽光と土星磁気圏の高エネルギー粒子によりメタンは解離・電離され、ヘイズ層を構成するソリン (高分子有機物) が生成される。

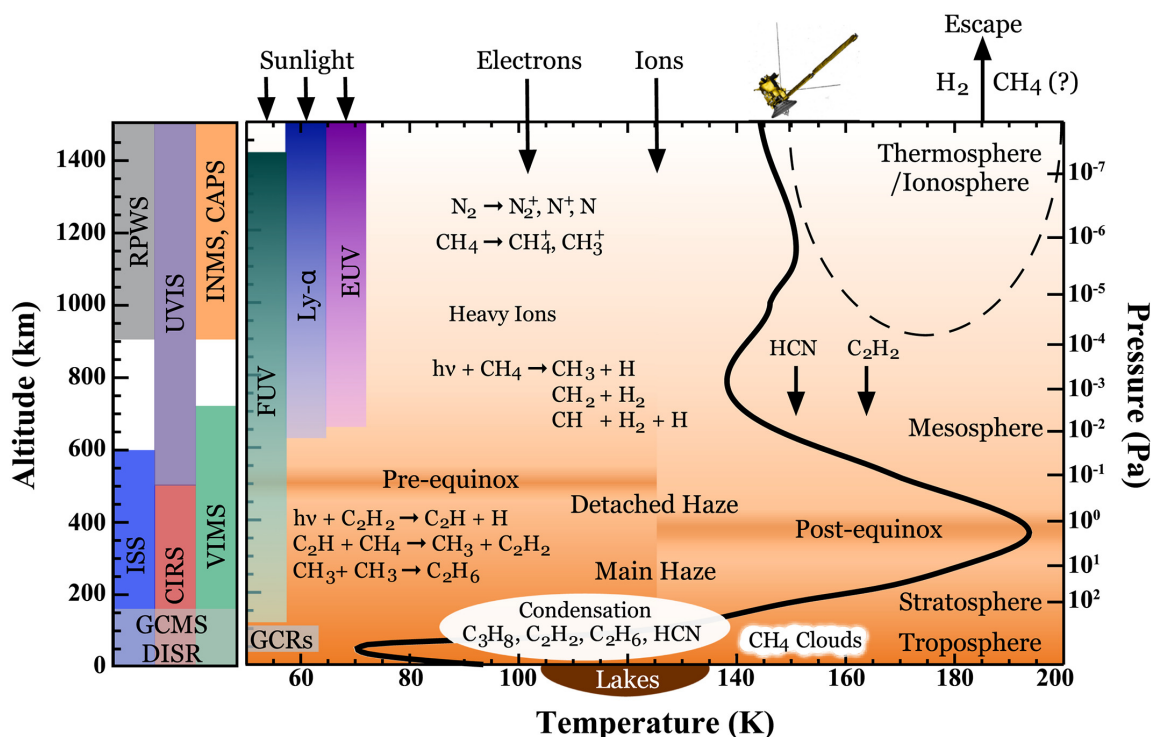


図 1.2 タイタン大気の構造、化学反応及び Cassini 探査機の観測装置がカバーする高度。黒線は Huygens probe 探査機が観測した大気温度 [Hörst, 2017]。

1.2 先行研究

タイタン大気には 3 つの時間スケールの変動があり、時間スケールが長いものから、1 タイタン年 (29.5 年) の長時間スケール変動 (季節変動)、太陽周期活動 (周期約 11 年) による変動、1 タイタン日 (15.95 日) の短時間スケール変動である。長時間スケールの変動は大気の組成・温度変化 [e.g. Vinatier et al., 2015], ヘイズ層の濃度・高度変化 [e.g. Lorenz et al., 1997], 対流圏雲の季節変動 [Rodriguez et al., 2014] などが観測されている。太陽周期活動は熱圏メタン濃度を変動させている [Westlake et al., 2014]。短時間スケールの変動は

熱圏温度の日変動 [Westlake et al., 2011; Snowden et al., 2013] や対流圏雲の移動 [e.g. Roe et al., 2005] が観測されている。

1.2.1 長時間スケールの時間変動 (季節変動)

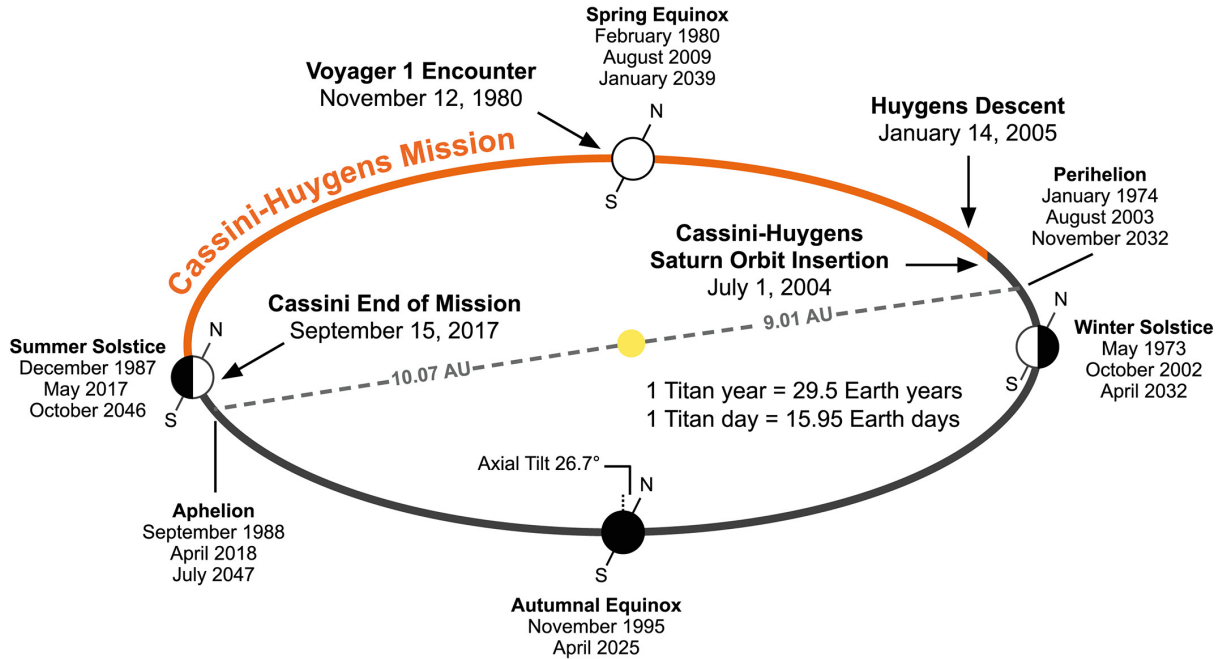


図 1.3 Cassini-Huygens ミッションの期間における土星軌道及び自転軸の向き [Hörst, 2017].

土星 (26.73°) 及びタイタン (0.6°) の赤道傾斜角と土星の公転運動により、約 30 年周期の季節変動がタイタンに生じている。Cassini 探査機は 2004 年 7 月 1 日に土星周回軌道に投入され、2017 年 9 月 15 日まで土星及び衛星を観測した。約 13 年間に及ぶ観測期間はタイタンの 1 年の約 45% にわたる。Cassini 探査機の観測期間前後では、タイタン南半球は 2002 年 10 月に夏至、2009 年 8 月に秋分、2017 年 5 月に冬至となった。

Cassini 探査機は大気組成変化、ヘイズ層の濃度・高度変化、対流圏の季節変動を観測した。図 1.4 は南緯 44° における大気温度及び南緯 46° における微量元素 (C_2H_6 , C_2H_2 , C_3H_8 , HCN , C_2H_4 , HC_3N , CO_2 , C_3H_4 , C_4H_2) の混合比である。季節によって温度及び微量元素の混合比が変化している。

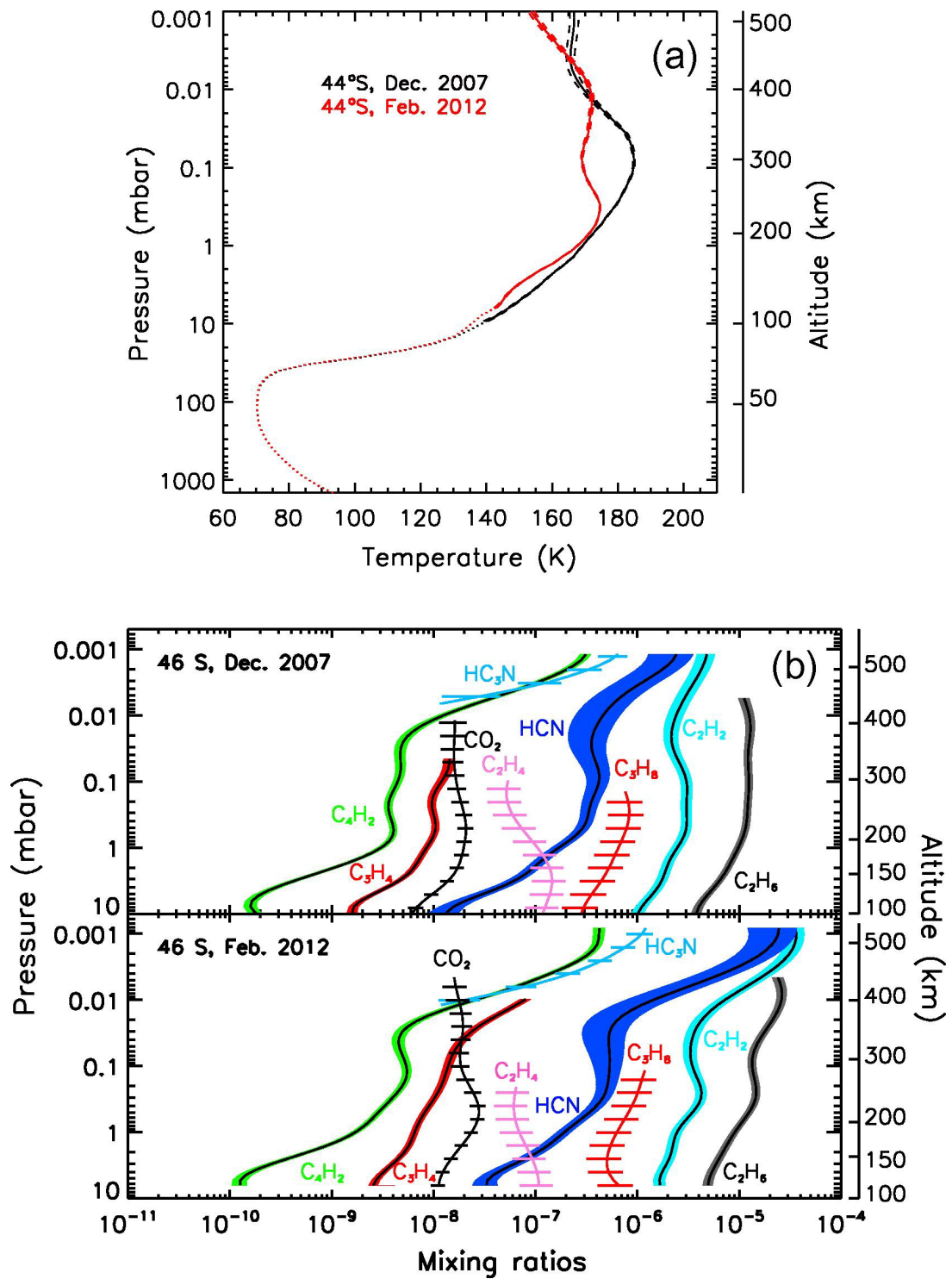


図 1.4 南緯 44° における温度の季節変動 (上) と南緯 46° における微量元素混合比の季節変動 (下) [Vinatier et al., 2015]. 南半球は 2009 年の秋分から冬に移りつつある。成層圏は冬になるにつれて温度が低下している。同時に HCN , C_2H_2 , C_4H_2 などの微量元素は濃度が上昇している。

タイタンには季節変動に由来する明るさの南北非対称性がある。この非対称は North-South Asymmetry と呼ばれ、冬半球のヘイズが豊富であることが非対称性の原因であると考えられている。ヘイズは可視光の短波長でアルベドが小さく、長波長でアルベドが大きいため、ヘイズ濃度が高い冬半球は長波長で明るくなる [Vashist et al., 2023]。季節によりヘイズ濃度が変化するため、明るさの非対称性は反転する [Lorenz et al., 1997]。

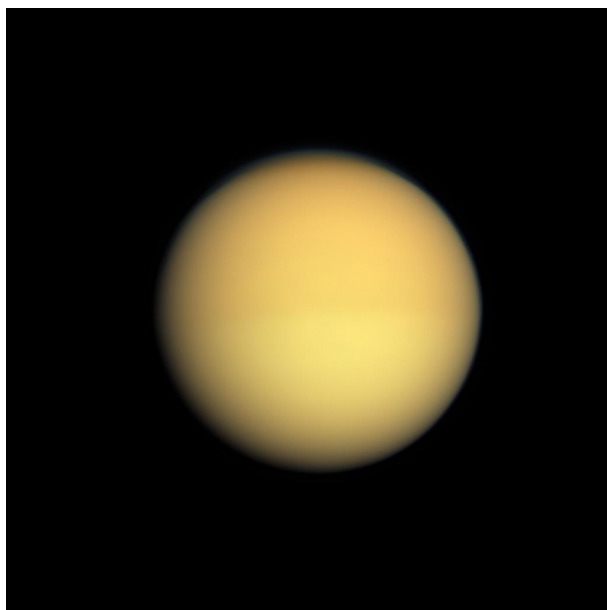


図 1.5 Cassini 探査機が 2009 年 8 月 25 日に撮影したタイタン。複数の波長域で撮影した画像を合成した画像。画像上方向が北方向。北半球がわずかに暗く、南半球はわずかに明るい。北半球は夏至、南半球は冬至に向かう途中であり、南半球でヘイズ層の濃度が増し、長波長で明るい。長波長の可視光画像で南半球が明るいため非対称性が生じている [Credit: NASA/JPL/Space Science Institute]。

また、ヘイズ層の高度は季節により変動する。2つのヘイズ層のうちディタッチドヘイズ層は春分点通過後に高度低下が観測された [West et al., 2011; Koskinen et al., 2011]。高度変化のメカニズムは、ハドレー循環の移動が原因と考えられており、大規模循環モデルではディタッチドヘイズ層の季節変動が再現されている [Hörst, 2017]。

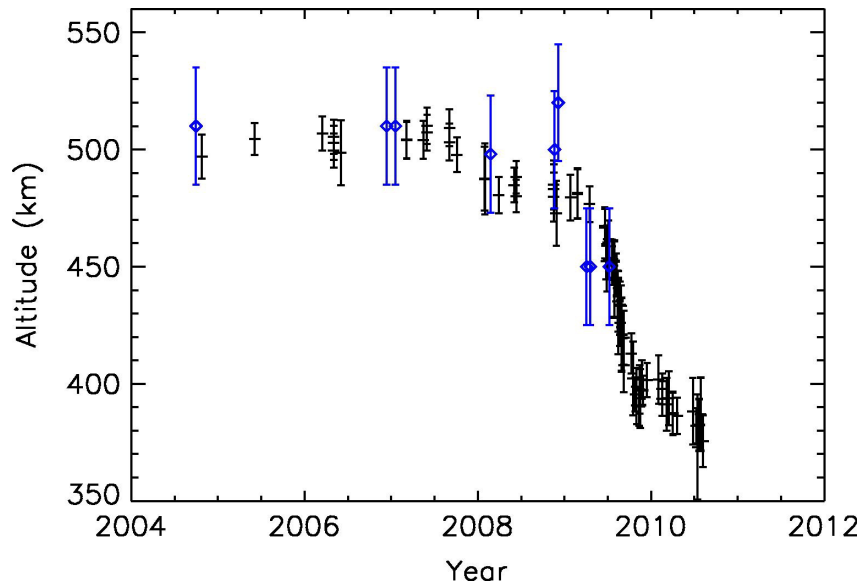


図 1.6 ディタッチドヘイズ層の高度変化. 青色は Cassini 探査機に搭載された観測装置 UVIS, 黒色は観測装置 ISS によって観測されたディタッチドヘイズ層の高度. 2009 年の春分点通過前後でディタッチドヘイズ層の高度が変化している [Koskinen et al., 2011].

対流圏においても季節変動が観測されている. 対流圏の雲と降雨は日射量が最大となる領域で発生する傾向があり [Hörst, 2017], 2002 年は雲と降雨は主に夏の南半球で観測されたが, 南半球が秋分を過ぎた 2009 年以降は両半球で雲と降雨が観測された. 春分点の通過後において, 対流圏の雲は Cassini-Huygens 探査機や地上のモニタリング・キャンペーンからはほとんど検出されず, 雲の活動は冬半球の方が低調である可能性を示している [Rodriguez et al., 2014].

1.2.2 太陽周期活動による時間変動

Westlake et al. (2014) は太陽周期活動 (周期約 11 年) によって熱圏のメタン濃度変動していることを明らかにした。Cassini 探査機による 2004 - 2013 年の観測期間中、太陽活動が極大に向かうにつれて、熱圏のメタン濃度が低下した。太陽光の EUV/UV が増加することで、メタンが破壊され濃度が低下したと考えられる。一方で太陽活動が極大を迎えた後は、熱圏下部、成層圏からメタンが供給されることで 3 地球年で極大期以前のメタン濃度に回復すると予測された。

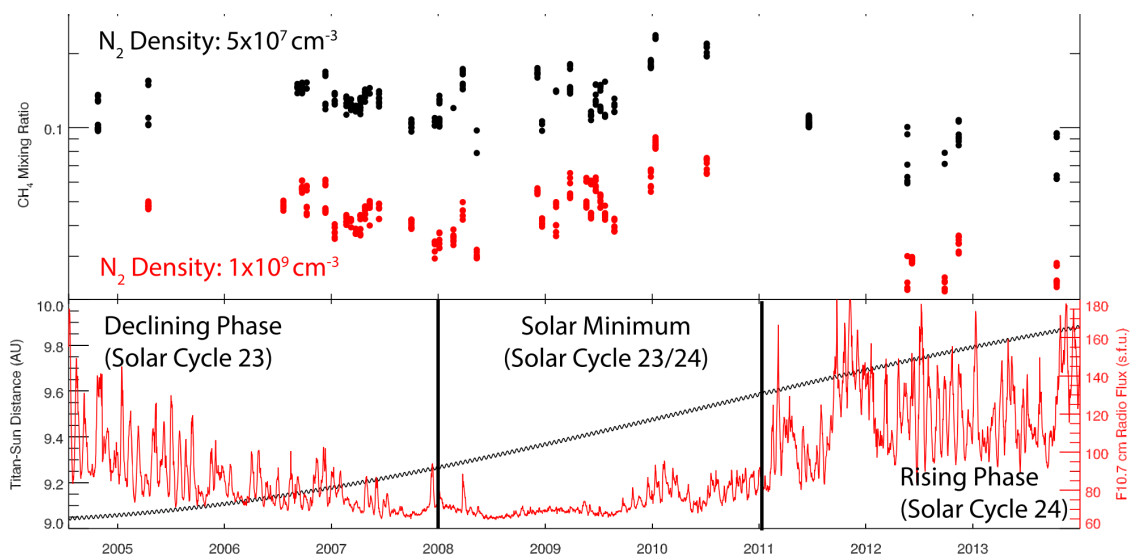


図 1.7 太陽周期活動によるメタン濃度の変動. 熱圏のメタン濃度 (上) は太陽周期活動 (下) が上昇フェーズにあると濃度が低下する [Westlake et al., 2014].

1.2.3 短時間スケールの時間変動

Westlake et al. (2011), Snowden et al. (2013) は Cassini 探査機に搭載されたイオン・中性質量分析計 (INMS) により熱圏の大気密度・温度を測定した。INMS の観測から、土星磁気圏がタイタン熱圏温度に影響を及ぼしていることが明らかになった。図 1.8 からプラズマの密度が大きいプラズマシート内では熱圏の温度が高く、プラズマの密度が小さいローブでは熱圏の温度が低い傾向がわかる。

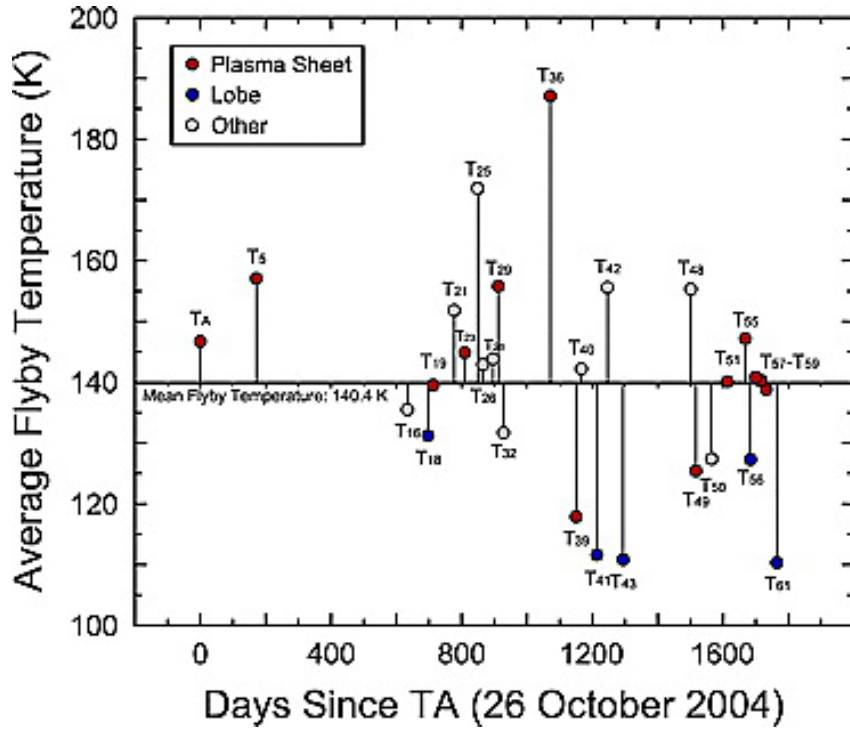


図 1.8 Cassini 探査機によるフライバイ観測の日付と熱圏の温度. 赤色の点はタイタンがプラズマシート内, 青色はタイタンがローブ内に位置する [Westlake et al., 2011].

数日間にわたるモニタリング観測により, 対流圏の雲が移動していることが明らかにされている. 地上望遠鏡によるモニタリング・キャンペーン [Roe et al., 2005; Schaller et al., 2006a; Schaller et al., 2006b; Ádámkovics et al., 2010] や Cassini 探査機 [Ádámkovics et al., 2010; Rodriguez et al., 2014] により, 対流圏の雲は観測されきた. 表 1.2 はモニタリング・キャンペーンの先行研究の表である. 対流圏の雲はヘイズの散乱とメタンの吸収波長 (619, 727, 889 nm) を避けた赤外波長域で観測が行われた. 観測により対流圏のダイナミクスや季節変動, 突発的な雲の発生などが明らかにされた [Schaller et al., 2006a].

表 1.2 対流圏の雲観測実績

先行研究	観測波長域 [nm]	観測期間
Roe et al. (2005)	2111-2137, 2154-2183	2003-12-18, 2004-04-04 - 2004-04-09, 2004-04-30, 2004-05-04 - 2004-05-07, 2004-09-02
Schaller et al. (2006a)	2111-2137, 2154-2183	2004-09-28, 2004-10-02, 2004-10-03, 2004-10-07, 2004-10-08, 2004-10-23, 2004-10-28
Schaller et al. (2006b)	2038.1-2142.9, 2111.2-2145.2, 2142.6-2178.0, 2121.6-2229.7	2003-09-17, 2003-09-10 - 2003-09-12, 2003-11-09 - 2003-11-18, 2003-12-10, 2003-12-15 - 2003-12-18, 2003-12-24 - 2003-12-27, 2004-01-10, 2004-04-04 - 2004-04-09, 2004-05-04 - 2004-05-07, 2004-09-02, 2004-09-28, 2004-10-02 - 2004-10-08, 2004-11-01 - 2004-11-05, 2004-11-27, 2004-12-21 - 2004-12-27, 2005-01-14 - 2005-01-16, 2005-01-20 - 2005-01-28, 2005-02-08 - 2005-02-25, 2005-03-01 - 2005-03-05, 2005-03-09, 2005-03-24, 2005-09-29, 2005-10-09 - 2005-10-10, 2005-11-21 - 2005-11-24, 2005-12-24
Adamkovics et al. (2010)	1450-2450	2006-12-28, 2007-01-28 - 2007-01-31

短時間スケールの時間変動については、未観測の空間/時間領域で明らかにされていないことがある。例えば、Westlake et al. (2011), Snowden et al. (2013) は土星磁気圏と熱圏温度の関係を明らかにしたが、中間圏以下の大気で変動が生じているかどうかは不明である。対流圏の雲のモニタリング観測では、観測期間中にヘイズ層、メタン量がどのような変動をしているかどうかは明らかにされていない。

観測されていない領域で、タイタン大気が公転運動に影響を受けるメカニズムを想定することはできる。高エネルギー粒子は熱圏から中間圏でメタンを解離させ (式 (1)), 太陽光はメタンを光分解する (式 (2)) [Hörst (2017)]。解離・分解したメタンは化学反応のプロセスをすすみ、ヘイズ層を構成するソリン (高分子有機物) となる。高エネルギー粒子と太陽光は公転運動により変動するため、タイタン大気には公転運動と関係した時間変動が考えられる。しかしながら、公転運動によるメタン濃度及びヘイズ層の変動は明らかにされていない。



1.3 研究目的

本研究はタイタン大気における短時間スケールの時間変動の解明を目的とする。1.2 節で述べたとおりタイタン大気では太陽光と土星磁気圏由来の高エネルギー粒子により、メタンの分解とヘイズ層粒子の生成が生じている。しかしながら公転運動によるメタン量またはヘイズ層の変動については観測がなされていない。

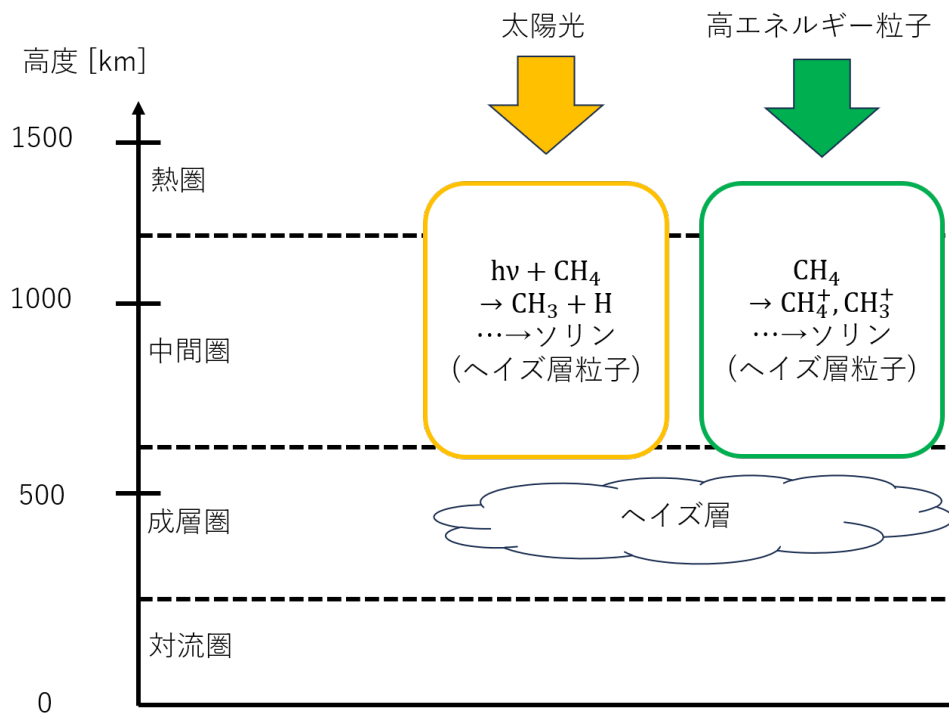


図 1.9 メタン分解とヘイズ層粒子生成の高度分布. 熱圏から中間圏にかけて、太陽光と高エネルギー粒子によりメタンが分解されソリンが生成される化学反応が生じる。

先行研究で明らかにされた短時間スケールの時間変動は、Westlake et al. (2011), Snowden et al. (2013) による熱圏温度の変動、対流圏雲のモニタリング・キャンペーン [e.g. Roe et al., 2005] による雲の運動に限られている。一方で、熱圏温度以外に高エネルギー粒子が及ぼす影響や、メタン濃度・ヘイズ層の変動は明らかにされていない。

先行研究で観測されていない空間/時間領域において、短時間スケールの時間変動がいくつか想定できる。ひとつめに、太陽周期活動の太陽フラックス変動と熱圏メタン濃度の関係から、タイタン公転運動による太陽フラックス変動がメタン濃度に影響を及ぼす可能性がある。ふたつめに、プラズマシートの高エネルギー粒子による熱圏温度の変動から、メタンの電離とソリンの生成または有機物の熱分解によるメタン濃度の変動が考えられる。

本研究ではメタン吸収波長のモニタリング観測を行うことで、タイタン公転によるメタン及びヘイズの変動を調査する。メタン吸収波長は、メタンによる吸収とヘイズ層による散乱の影響がある [Trafton, 1975]。メタン吸収波長のモニタリング観測を行い、公転運動とメタン濃度またはヘイズ層の変動を明らかにする。

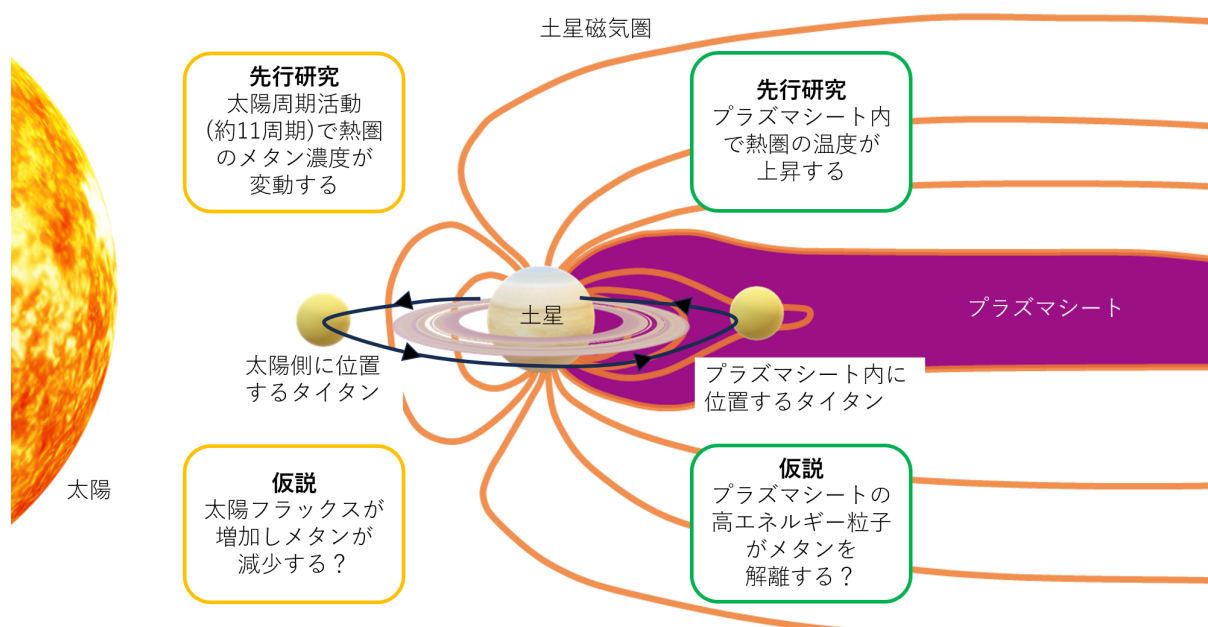


図 1.10 先行研究で明らかにされているタイタン大気の時変動，本研究で検討する公転運動により生じる時間変動，及びタイタンの公転と太陽，土星磁気圏の概念図．太陽周期活動により熱圏メタン濃度が変動すること，プラズマシート内で熱圏温度が上昇することが明らかにされている．一方で，公転運動による太陽フラックスの変動，土星磁気圏の高エネルギー粒子によるメタンの変動は明らかにされていない．

本研究の最終的な目的はタイタン大気の時変動を理解することで，原始地球に存在した化学反応システムと生命誕生につながるプロセスの解明である．タイタン大気は光合成による酸素供給以前の還元的な原始地球大気に近い組成である．原始地球大気で生じた化学反応は，タイタン大気で現在生じている化学反応から相似的に理解することができるだろう．原始地球大気が太陽光・太陽風から与えられた影響を明らかにするために，タイタン大気の時変動の解明は重要である．

2 手法

本研究では、北海道大学大学院理学研究院附属天文台に設置されたピリカ望遠鏡とその搭載装置を用いて、メタン吸収波長（619, 727, 889 nm）を含む波長域におけるタイタンの多波長撮像観測を行った。IRAF による一次処理，Astropy による開口測光解析を行い，タイタンの反射率，メタン吸収量指標 (RR 及び RDI) を計算した。また，先行研究では明らかになっていない公転周期に同期した変動を解析するために，タイタンの真近点角および近日点からの離角に着目して解析した。

2.1 観測手法

2.1.1 観測装置

北海道大学大学院理学研究院附属天文台は北海道名寄市にあり，ピリカ望遠鏡 (図 2.11, 表 2.3) を所有している。ピリカ望遠鏡とその搭載観測装置は，太陽系内惑星を優先的に観測することを目的として 2011 年に本格運用を開始した。主鏡口径は 1.6 m であり，その大きさは惑星観測用の望遠鏡としては世界最大級である。ピリカ望遠鏡のカセグレン焦点には，本研究院宇宙惑星グループによって開発されたスペクトル撮像装置 MSI (Multi-Spectrum Imager) が搭載されている [Watanabe et al., 2012](図 2.12, 表 2.4)。本研究では，大学の望遠鏡が持つ豊富な観測時間を活かして，2021 年から 2023 年にかけてタイタンの大気観測を実施した。

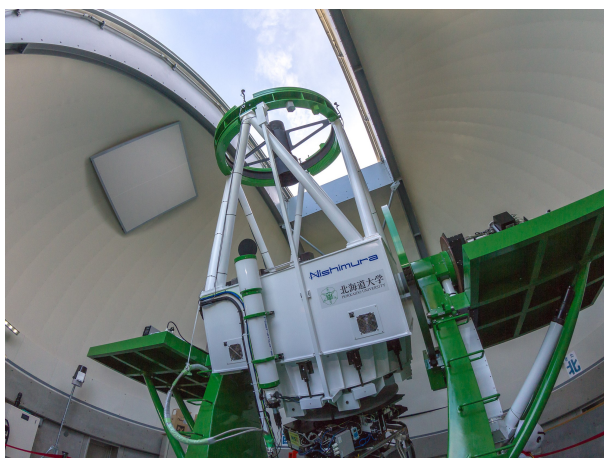


図 2.11 ピリカ望遠鏡の外観

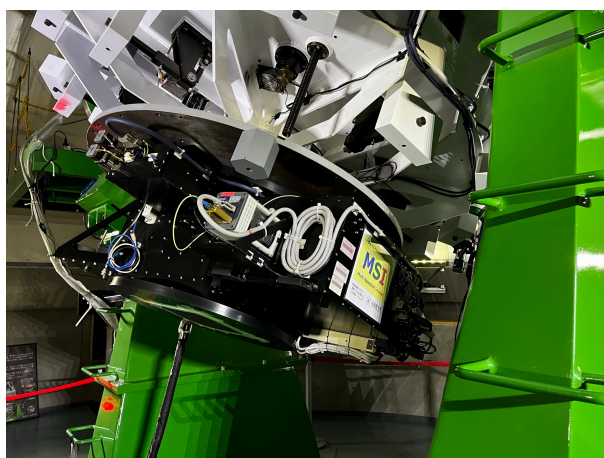


図 2.12 MSI の外観

表 2.3 ピリカ望遠鏡の諸元

位置	44°22" N, 142°28" E
光学系	リッチークレチアン
焦点	カセグレン, ナスミス×2
合成焦点距離	19,238 mm
合成F値	f/12.0
主鏡有効径	1,600 mm

MSI は 2 種類の液晶波長可変フィルター (以下 LCTF) と 512×512 ピクセルの電子増倍型 CCD，及び複数

のブロードバンドフィルターとナローバンドフィルターを搭載している．LCTF は可視ユニット (VIS) と近赤外ユニット (SNIR) が設置されており，VIS の波長域は 400 - 720 nm，SNIR の波長域は 650 - 1100 nm である．

表 2.4 MSI の諸元

視野角	3.3 × 3.3 arcmin
波長域	360-1050 nm
液晶可変フィルター	VIS: 400-720 nm SNIR: 650-1100 nm
ナローバンドフィルター	360, 365, 370, 380, 390 nm
ブロードバンドフィルター	Johnson-Cousins U, B, V, R, I
カメラ	浜松ホトニクス 電子増倍型CCDカメラ C9100-13
有効画素数	512 × 512

図 2.13 は VIS 及び SNIR で指定したフィルターに対する透過率である．図 2.14 は各中心波長での FWHM(半値全幅) である．本研究で使用了波長域において FWHM は 5 - 15 nm である．

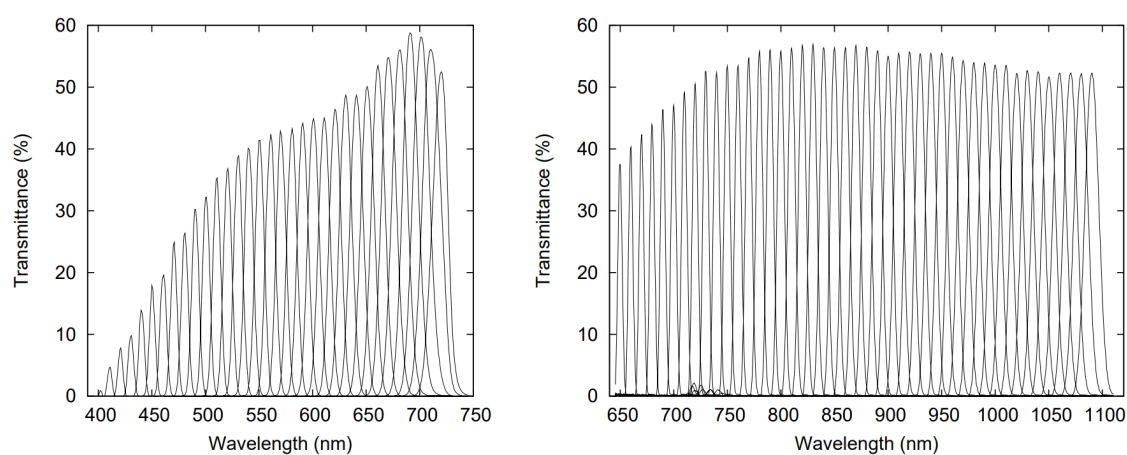


図 2.13 VIS(左), SNIR(右) の透過率分布 [Watanabe et al., 2012].

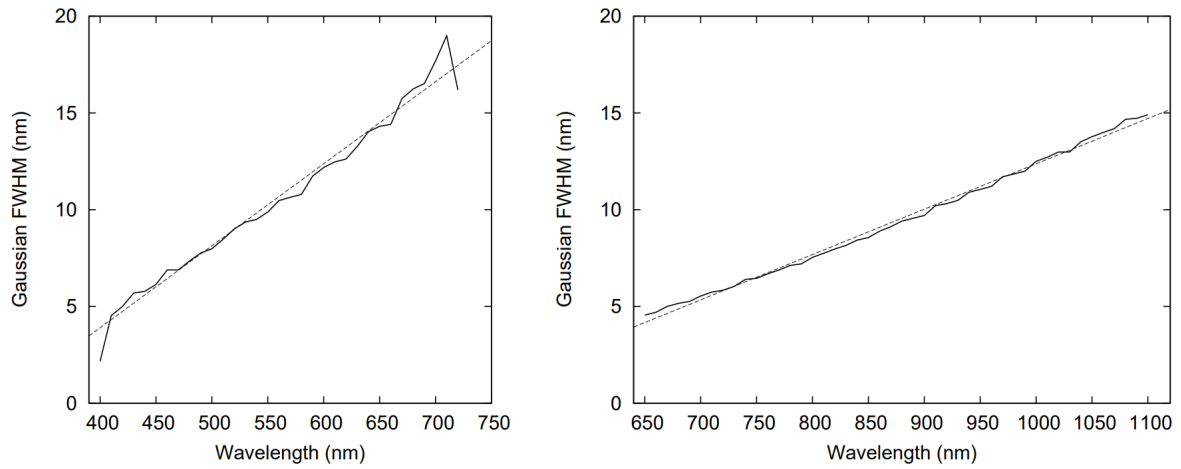


図 2.14 VIS(左), SNIR(右) における各波長での FWHM [Watanabe et al., 2012].

2.1.2 観測手法

メタン吸収波長 (619, 727, 889 nm) を含む波長域でタイタンの多波長観測を行った。2021 年, 2022 年は 700 - 920 nm の波長域を 5 nm ごとに測光した。2023 年は 601- 634 nm, 700 - 757 nm, 872 - 923 nm の波長域を 3 nm ごとに測光した。

2.1.3 相対測光

観測対象と同条件の天候, 大気減光で基準となる標準星を測光しタイタンの明るさを求める相対測光を行った。タイタンの反射率を観測するために, 太陽と同スペクトル型 (G 型) の HR8414, HR8232 を標準星として選定した。

表 2.5 標準星 HR8414 の諸元 [Bright Star Catalogue, 5th Revised Ed. (Hoffleit+, 1991)]

カタログ名	HR8414/HD209750/HIP109074
スペクトル型	G2 I b
座標(RAJ2000)	22 05 47.000, -00 19 11.00
V等級	2.96
星座	みずがめ座

表 2.6 標準星 HR8232 の諸元 [Bright Star Catalogue, 5th Revised Ed. (Hoffleit+, 1991)]

カタログ名	HR8232/HD204867/HIP106278
スペクトル型	G0 I b
座標(RAJ2000)	21 31 33.500, -05 34 16.00
V等級	2.91
星座	みずがめ座

2.1.4 観測結果

タイタンと標準星の観測結果は表 2.7, 2.8 のとおりである.

表 2.7 タイタンの観測結果

観測日	タイタンの観測時刻 (JST)	タイタンの露光時間 [s]	観測波長域 (nm)
2021/10/25	19:03-19:46	5, 20	700-920
2021/10/26	19:02-19:23	5, 20	700-920
2022/8/26	22:55-23:02	5	700-920
2023/9/7	21:39-23:11	60, 90	601-634, 700-757, 872-923
2023/10/8	22:28-23:03, 23:11-23:32	60, 90	601-634, 700-757
2023/10/11	19:00-20:31	60	601-634, 700-757, 872-923
2023/10/23	18:14-19:01, 19:16-19:59, 20:11-20:23	60	601-634, 700-757, 872-923
2023/10/25	18:10-19:17	60	601-634, 700-757, 872-923
2023/11/15	19:50-20:03	60	601-634

表 2.8 標準星の観測結果

観測日	標準星	標準星の観測時刻 (JST)	標準星の露光時間 [s]	観測波長域 (nm)
2021/10/25	HR8232	19:30-19:34	0.5	700-920
2021/10/26	HR8232	19:32-20:32	1	700-920
2022/8/26	HR8232	21:59-22:07	1	700-920
2023/9/7	HR8414	23:45-23:59	0.5, 1	601-634, 700-757, 872-923
2023/10/8	HR8414	23:04-23:08	0.5, 1	601-634, 700-757
2023/10/11	HR8414	20:35-20:46	0.5, 1	601-634, 700-757, 872-923
2023/10/23	HR8414	19:04-19:13, 20:02-20:08	0.5, 1	601-634, 700-757, 872-923
2023/10/25	HR8414	19:23-19:31	0.5, 1	601-634, 700-757, 872-923
2023/11/15	HR8414	20:36-30:38	0.5	601-634

2.2 解析手法

2.2.1 一次処理

天体からの光は、観測する過程で地球大気・望遠鏡・搭載装置などから様々な影響を受ける。これらの影響を補正、天体起源の真の情報を得るための処理を一次処理という。本研究では、天文データ解析ソフトウェア IRAF を用いて、以下のように一次処理を行った。

$$\text{オブジェクトフレーム} = \frac{\text{オブジェクトフレーム (raw)} - \text{バイアスフレーム}}{\text{フラットフレーム} - \text{バイアスフレーム}}$$

CCD に光をいれない状態で取得したバイアス画像には、CCD にかけられたバイアス電圧が反映される。各観測日にバイアス画像を取得し、中央値でスタックしたフレーム (以下バイアスフレーム) を作成した。オブジェクトフレームからバイアスフレームを減算した。

均一な光源を撮像したフラット画像は CCD の感度ムラが反映される．LCTF の各波長でフラット画像を取得し，中央値でスタックしたフレーム（以下フラットフレーム）を作成した．各波長での CCD の感度ムラを補正するため，フラットフレームからバイアスフレームを減算した画像でオブジェクトフレームを除算した．なお，フラット画像の取得はピリカ望遠鏡のドーム内に設置されているフラット板を使用した．

2.2.2 開口測光

開口測光とは天体を中心とした開口半径を設定し，星像全体を含む開口内のカウント値を積分することで，天体の明るさを見積もる手法である．

本研究では天体データ解析ソフトウェアパッケージの Astropy を使用し開口測光を行った．開口半径を 1 ピクセルごとに広げ，カウント値の合計がほぼ一定となる半径を設定した．設定する開口半径 r_n のときカウント値の積分結果 S_n とすると， r_{n+1} のカウント値の積分結果 S_{n+1} に対する関係は式 (3) を満たす半径を設定した．式 (3) の手法を用いることで，天体のカウント値を漏らさず，かつ天体外のカウント値を含まずに積分することが可能である．

$$\frac{S_n}{S_{n+1}} = 0.99 \quad (3)$$

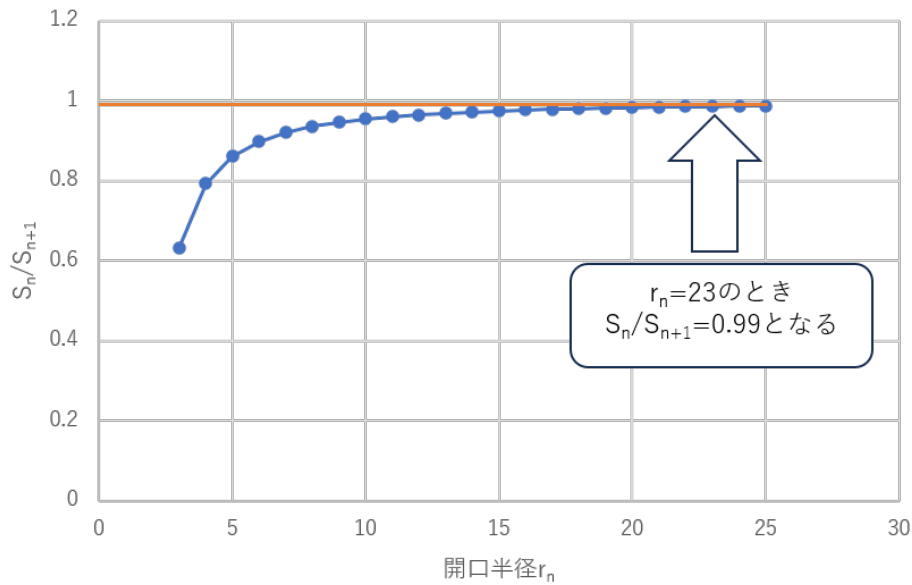


図 2.15 開口半径決定の概念図． S_n/S_{n+1} (青色) が 0.99(橙色) となるとき半径 r_n のカウント値を計測する．

2.2.3 反射率

反射率は Tan et al. (2022) を参考に式 (4) のとおりに導出した．

$$R(\lambda) = \frac{C_T(\lambda)}{t_T(\lambda)} \times \frac{t_S(\lambda)}{C_S(\lambda)} \times \frac{1}{10^{(V_{\text{Sun at Titan}} - V_S)/2.5}} \times \frac{1}{\Omega} \quad (4)$$

ここで $R(\lambda)$ は波長 λ でのタイタンの反射率, $C_T(\lambda)$ は波長 λ でのタイタンのカウント値, $t_T(\lambda)$ は波長 λ でのタイタンの露光時間, $C_S(\lambda)$ は波長 λ での標準星のカウント値, $t_S(\lambda)$ は波長 λ での標準星の露光時間, $V_{\text{Sun at Titan}}$ はタイタンでの太陽の等級, V_S は標準星の等級, Ω はタイタンの立体角である.

式 (4) を導出する過程を解説する. 波長 λ におけるタイタンのフラックス ($F_t(\lambda)$) は反射率 ($R(\lambda)$) とタイタンでの太陽のフラックス ($F_{\text{Sun at Titan}}(\lambda)$), タイタンの立体角 (Ω) から

$$F_T(\lambda) = R(\lambda) \times F_{\text{Sun at Titan}}(\lambda) \times \Omega \quad (5)$$

となる. 天体の明るさはフラックスに比例するため, フラックスとカウント値は比例関係にある. フラックスとカウント値の比例定数は, 同条件の観測では観測装置に依存するため,

$$\frac{F_S}{C_S/t_S} = \frac{F_T}{C_T/t_T} = \frac{R \times F_{\text{Sun at Titan}} \times \Omega}{C_T/t_T} \quad (6)$$

となる. 式 (5), (6) より,

$$R = \frac{C_T/t_T}{F_{\text{Sun at Titan}}} \times \frac{F_S}{C_S/t_S} \times \frac{1}{\Omega} \quad (7)$$

式 (7) において, ポグソンの式から $F_{\text{Sun at Titan}}$, F_S の比は V 等級の差に変換できる. 標準星と太陽のスペクトル型が一致するとき任意の波長でポグソンの式が成り立つ. すなわち,

$$-2.5 \times \log_{10} \frac{F_S}{F_{\text{Sun at Titan}}} = V_S - V_{\text{Sun at Titan}}$$

よって,

$$\frac{F_S}{F_{\text{Sun at Titan}}} = 10^{(V_S - V_{\text{Sun at Titan}})/(-2.5)} \quad (8)$$

式 (7), (8) より

$$R(\lambda) = \frac{C_T/t_T}{C_S/t_S} \times 10^{(V_S - V_{\text{Sun at Titan}})/(-2.5)} \times \frac{1}{\Omega} = \frac{C_T}{t_T} \times \frac{t_S}{C_S} \times \frac{1}{10^{(V_{\text{Sun at Titan}} - V_S)/2.5}} \times \frac{1}{\Omega}$$

以上より, 式 (4) が得られた.

式 (4) において, タイタンでの太陽の V 等級と Ω はタイタン-太陽, タイタン-地球の距離に依存するため, 観測日毎にタイタンでの太陽の V 等級と Ω の値を代入して反射率を計算した.

2.2.4 RR 及び RDI

メタン吸収量の指標として, RR(Reflectance Ratio) と RDI(Reflectance Delta Index) を定義した. メタン吸収波長の 619, 727 nm 及び 890 nm でのタイタンの反射率の大きさから, メタン吸収波長の深さを相対的に評価する.

メタン吸収波長における反射率と, 吸収の影響を受けない波長の反射率の比を RR と定義する. 619, 727, 890 nm での RR を $RR(619)$, $RR(727)$, $RR(890)$ とすると, それぞれの定義は式 (9) のとおりである.

$$\begin{aligned} RR(619) &= \frac{619 \text{ nm の反射率}}{601 \text{ nm の反射率}} \\ RR(727) &= \frac{727 \text{ nm の反射率}}{712 \text{ nm の反射率}} \\ RR(890) &= \frac{890 \text{ nm の反射率}}{872 \text{ nm の反射率}} \end{aligned} \quad (9)$$

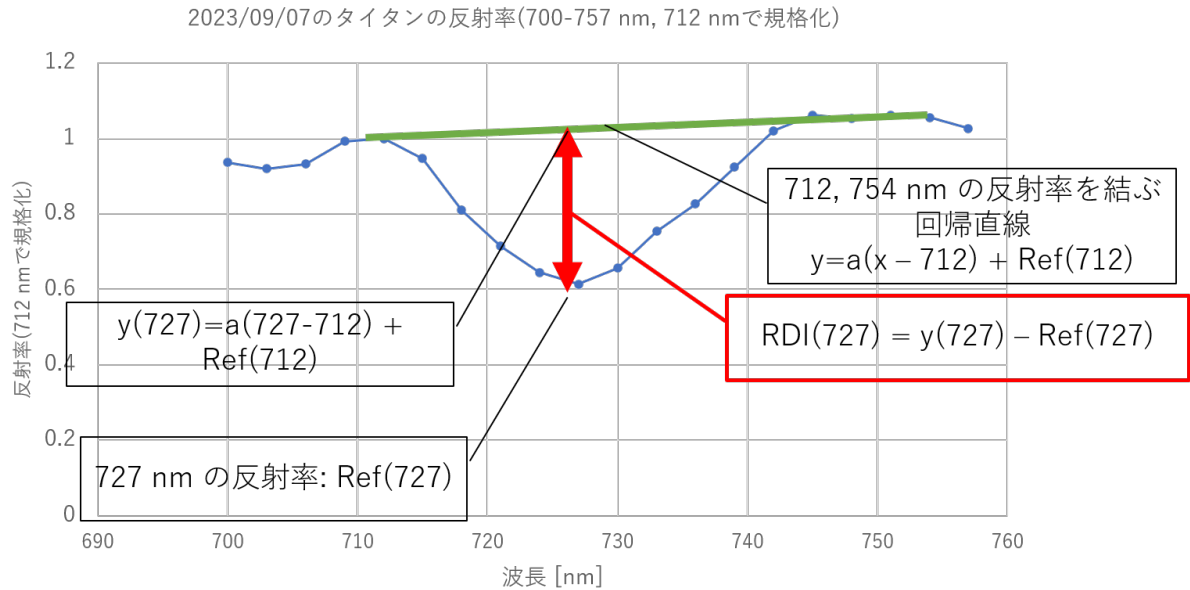


図 2.16 RDI の定義

メタン吸収波長における反射率を評価する指標として RDI(Reflectance Delta Index) を定義する。メタンの吸収波長を挟んだの 2 つの反射率から回帰直線を設定し、吸収波長の反射率と回帰直線の差を指標とした。図 2.16 は 727 nm での RDI, $\text{RDI}(727)$ の概念図である。波長 λ での規格化した反射率を $\text{Ref}(\lambda)$ とする。規格化する基準の波長は 2023 年の観測は 601, 712, 872 nm, 2021, 2022 年の観測は 710 nm とする。2023 年の観測では回帰直線は 601-634 nm, 712-754 nm, 872-911 nm に設定する。2021, 2022 年の観測では回帰直線は 710-755 nm に設定する。 λ での回帰直線の値を $y(\lambda)$ とする。各波長域の回帰直線, $y(\lambda)$ は式 10 のとおり定義した。

$$\begin{aligned} y_1(\lambda) &= \frac{\text{Ref}(634) - \text{Ref}(601)}{634 - 601}(\lambda - 601) + \text{Ref}(601) \\ y_2(\lambda) &= \frac{\text{Ref}(754) - \text{Ref}(712)}{754 - 712}(\lambda - 712) + \text{Ref}(712) \\ y_3(\lambda) &= \frac{\text{Ref}(911) - \text{Ref}(872)}{911 - 872}(\lambda - 872) + \text{Ref}(872) \end{aligned} \quad (10)$$

619, 727, 890 nm での RDI は式 11 のとおり定義した。

$$\begin{aligned} \text{RDI}(619) &= y_1(619) - \text{Ref}(619) \\ \text{RDI}(727) &= y_2(727) - \text{Ref}(727) \\ \text{RDI}(890) &= y_3(890) - \text{Ref}(890) \end{aligned} \quad (11)$$

RR, RDI はメタン量を定性的に評価できる。表 2.9 に示すとおり、メタン量が増加するとメタン吸収波長の反射率は減少し、RR は減少/RDI は増加する。反対にメタン量が減少すると、メタン吸収波長の反射率は増加し、RR は増加/RDI は減少する。

表 2.9 RR, RDI の示す特徴

RRの値が小さい/RDIの値が大きい	RRの値が大きい/RDIの値が小さい
反射率の凹が大きい	反射率の凹が小さい
メタン吸収波長での反射率が小さい	メタン吸収波長での反射率が大きい
タイタン大気に含まれるメタンが相対的に多い	タイタン大気に含まれるメタン量が相対的に少ない

2.2.5 タイタンの軌道要素

本研究では、公転軌道周期とメタン量の関係を解析するために、タイタンの軌道要素から真近点角及び近日点からの離角に着目した。

真近点角 (以下 TA) は軌道上の位置を表すパラメータであり、軌道の主焦点（共通重心が位置する）から近点方向と天体方向がなす角度と定義される。図 2.17 は TA の定義の概念図である。タイタンと土星の場合、共通重心からタイタン-土星の近点（以下 近土点）方向と共通重心からタイタン方向のなす角となる。TA は近土点で 0° であり、近土点から離れると TA は増加し $0^\circ - 360^\circ$ の範囲にある。本研究では NASA/JPL Horizons の出力結果を解析に用いた。

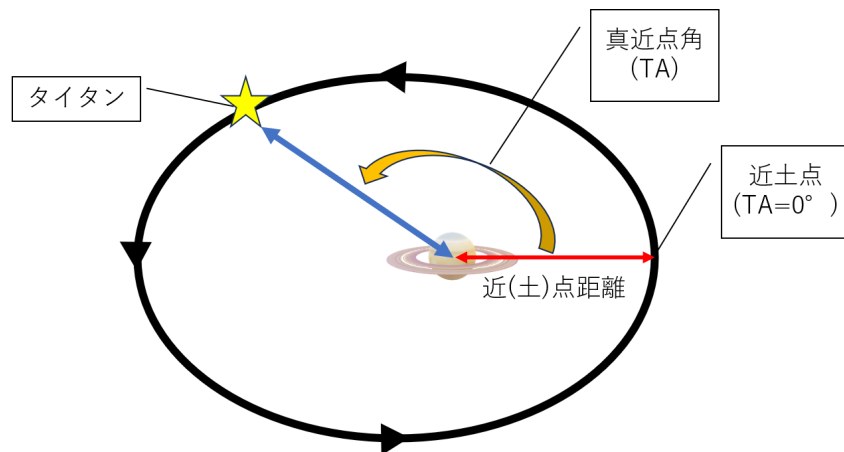


図 2.17 真近点角 (TA) の定義。共通重心から近土点方向 (赤矢印) と天体方向 (青矢印) がなす角度 (橙色) が真近点角である。

また、本研究ではタイタンの近日点からの角度を近日点離角と定義し解析に用いた。図 2.18 は近日点離角の概念図である。タイタンの近日点は土星の公転運動により変化するため、近日点離角の基準は変化する。近日点離角の範囲は $-180^\circ - 180^\circ$ とし、 180° を超えるとき、近日点の基準が変わる。近日点離角を用いることで、公転運動により変化する土星磁気圏の形状を考慮した解析を行う。

本研究の各観測日での TA、近日離角及び基準となる近日点は表 2.10 - 2.12 のとおりである。

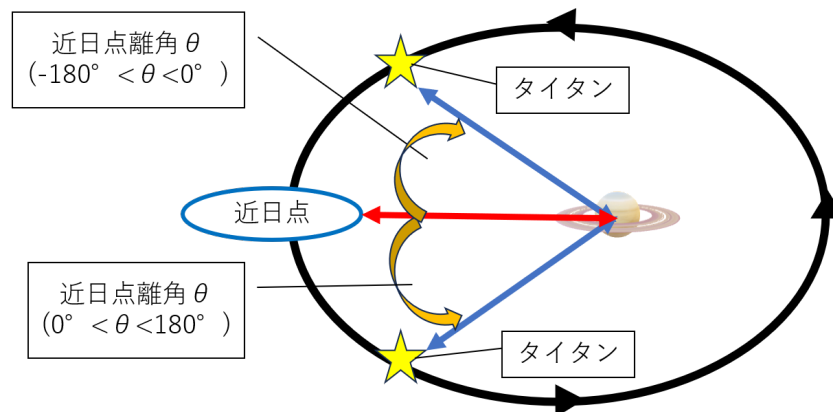


図 2.18 近日点離角の定義. 共通重心から近日点方向 (赤矢印) と天体方向 (青矢印) のなす角度が近日点離角である. 近日点離角は -180° - 180° の範囲に定義する.

表 2.10 2023 年観測日のタイタンの TA, 近日点離角

観測日	真近日点角(TA)	近日点離角	近日点離角の基準点となる近日点通過日付	近日点離角の基準点となるTA
2023/9/7	308.47	132.74	2023/9/1	175.73
2023/10/8	287.77	109.75	2023/10/3	178.02
2023/10/11	358.43	179.28	2023/10/19	179.15
2023/10/23	266.22	85.93	2023/11/4	180.29
2023/10/25	312.28	131.99	2023/11/4	180.29
2023/11/15	71.62	-109.82	2023/11/20	181.44

表 2.11 2022 年観測日のタイタンの TA, 近日点離角

観測日	真近日点角(TA)	近日点離角	近日点離角の基準点となる近日点通過日付	近日点離角の基準点となるTA
2022/8/26	83.16	-66.19	2021/8/29	149.35

表 2.12 2021 年観測日のタイタンの TA, 近日点離角

観測日	真近日点角(TA)	近日点離角	近日点離角の基準点となる近日点通過日付	近日点離角の基準点となるTA
2021/10/25	36.31	-91.00	2021/10/29	127.32
2021/10/26	59.76	-67.55	2021/10/29	127.32
2021/10/27	82.81	-44.51	2021/10/29	127.32

3 結果

2.2 節で述べた手法に基づき解析した結果を示す。

3.1 反射率

図 3.19 - 3.22 にタイタンの反射率を示す。

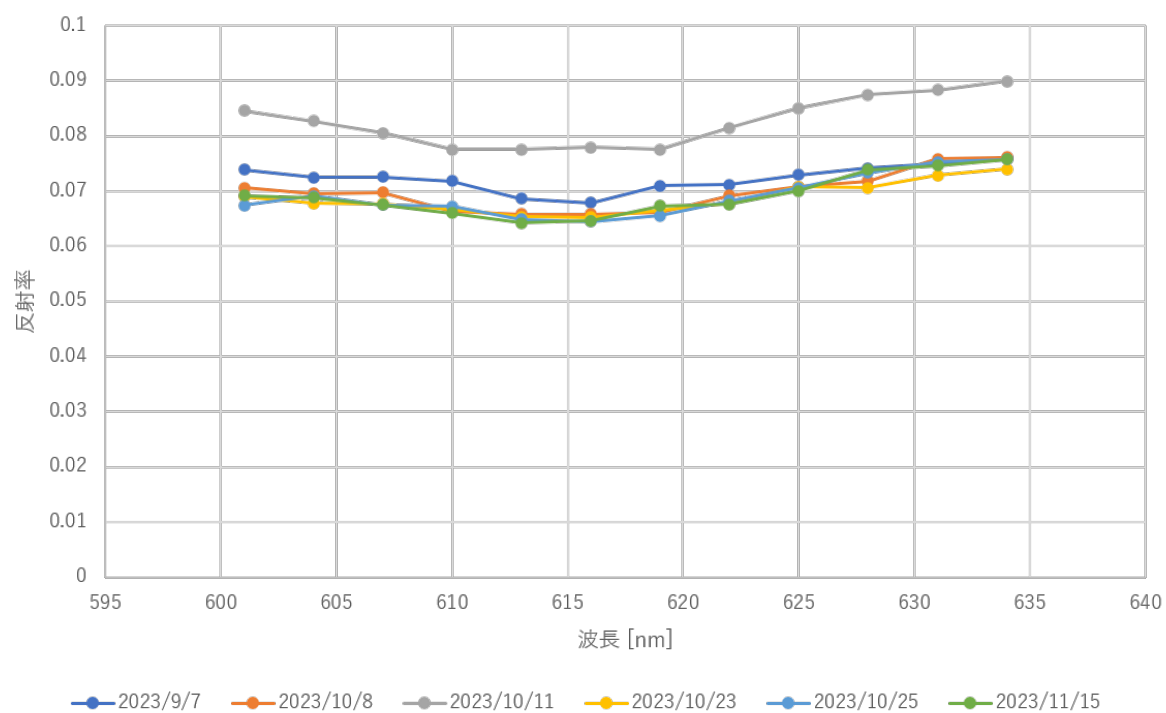


図 3.19 601 - 634 nm タイタン反射率. 619 nm のメタン吸収波長に大きな凹みは見られない. メタン吸収による反射率の減少が 727, 890 nm より小さい, または観測装置の特性によるためだと考えられる.

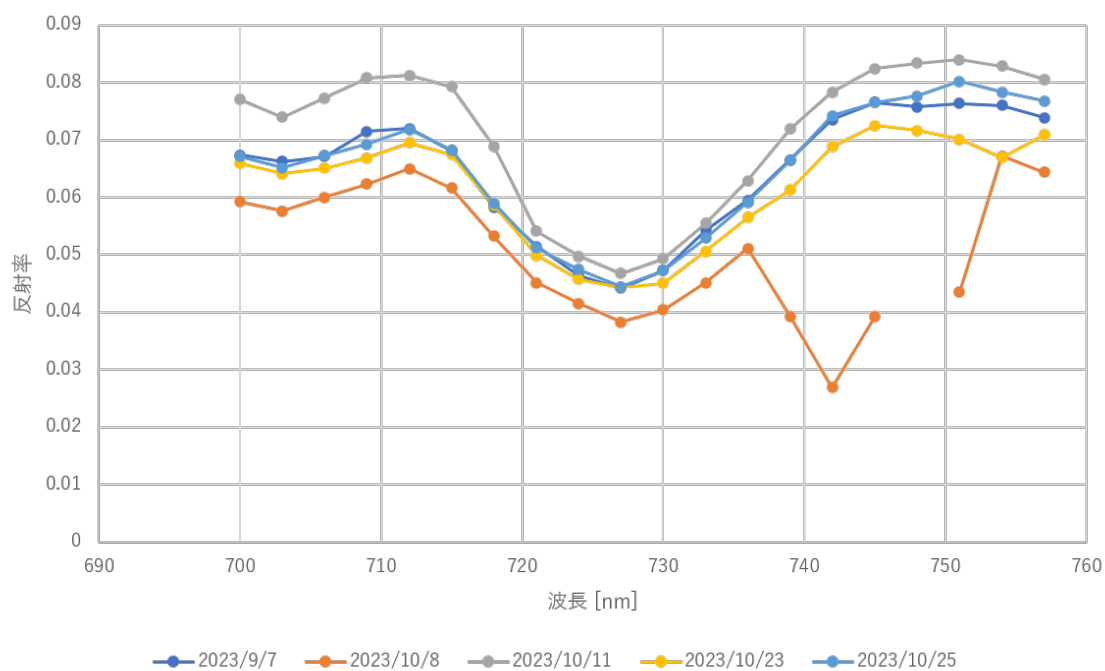


図 3.20 700 - 757 nm タイタン反射率 (2023 年の観測). 727 nm のメタン吸収波長の前後に反射率の減少がある.

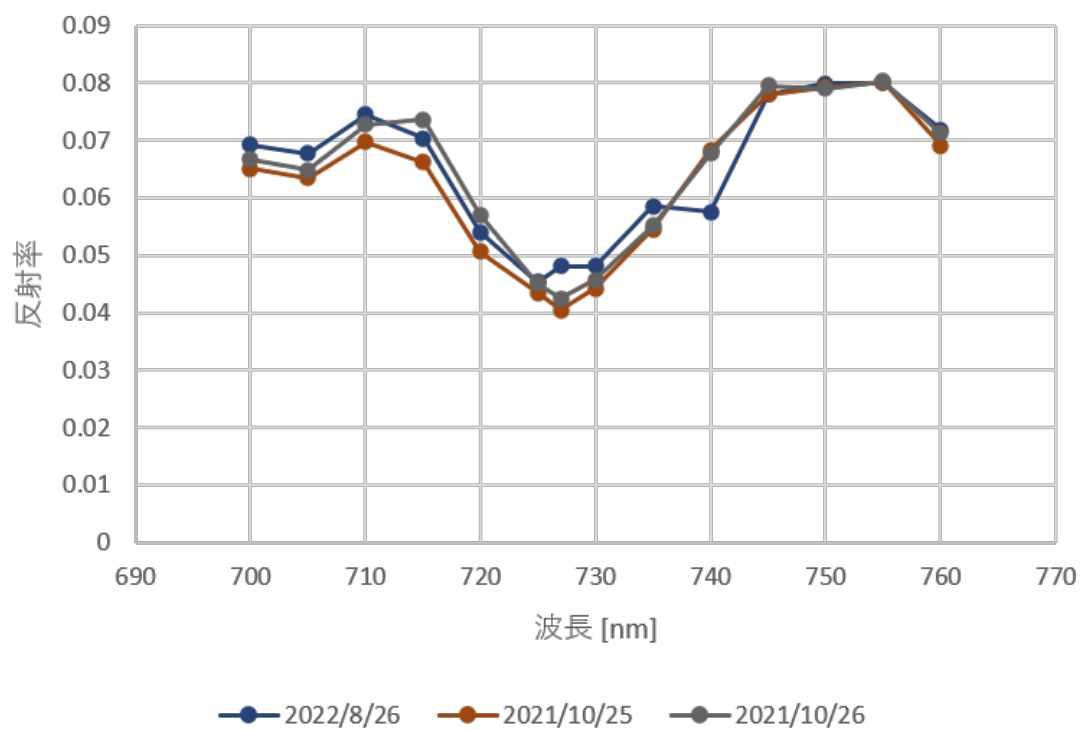


図 3.21 700 - 760 nm タイタン反射率 (2021, 2022 年の観測). 727 nm のメタン吸収波長の前後に反射率の減少がある.

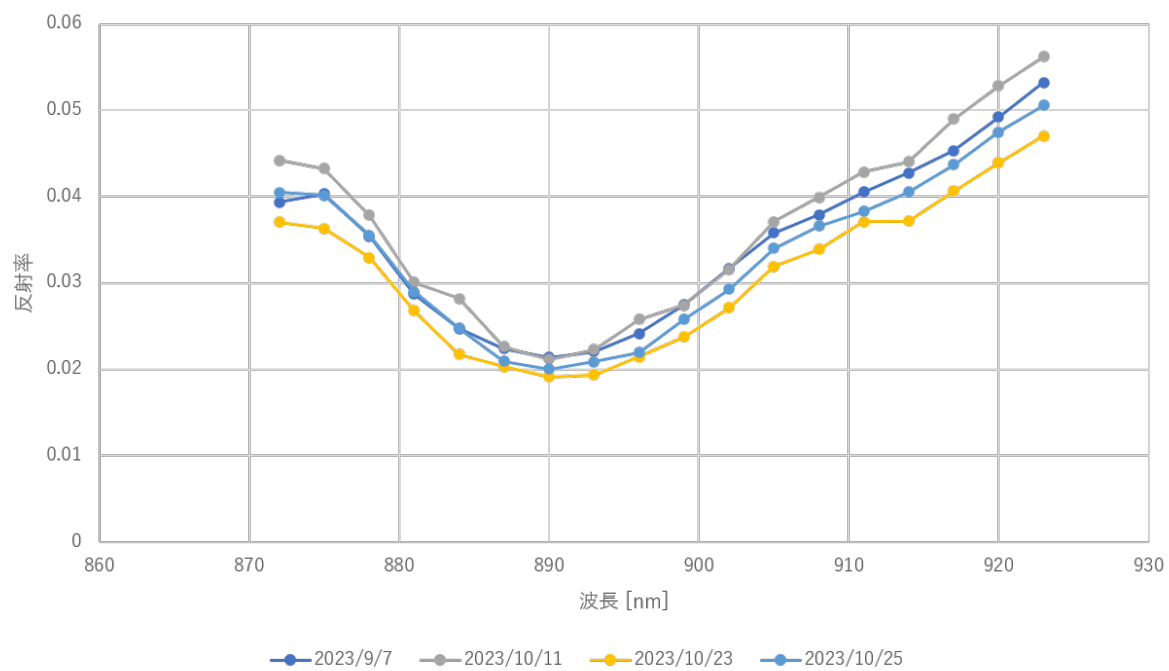


図 3.22 872 - 923 nm タイタン反射率. 889 nm のメタン吸収波長の前後に反射率の減少がある.

図 3.23 - 3.26 に規格化したタイタンの反射率を示す．2023 年の観測では 601, 712, 872 nm の反射率で規格化した．2021, 2022 年の観測は 710 nm の反射率で規格化した．

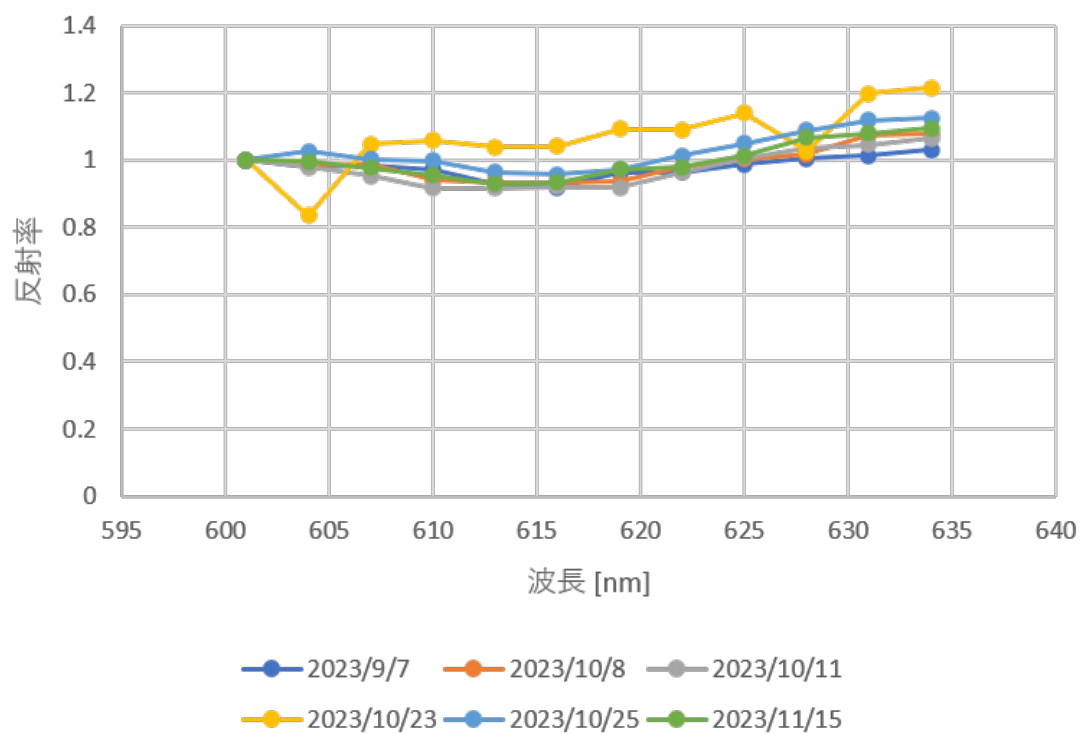


図 3.23 601 nm の反射率で規格化した 601 - 634 nm タイタン反射率．619 nm のメタン吸収波長に大きな凹みは見られない．メタン吸収による反射率の減少が 727, 890 nm より小さい，または観測装置の特性によるためだと考えられる．

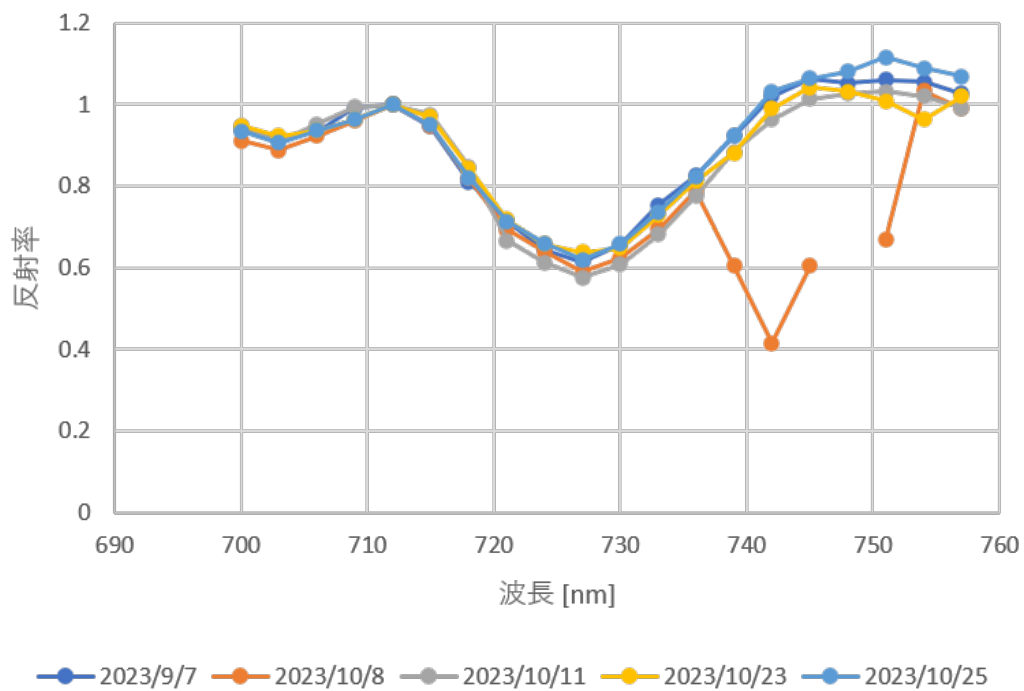


図 3.24 712 nm の反射率で規格化した 700 - 757 nm タイタン反射率 (2023 年の観測). 727 nm のメタン吸収波長の反射率は観測日より多少変動がある.

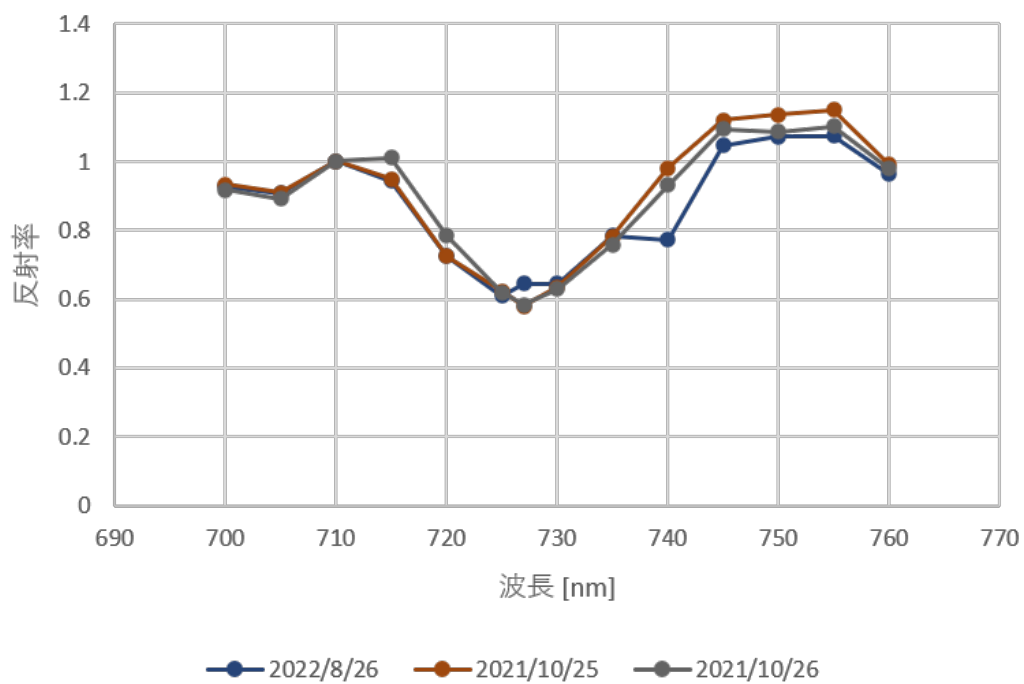


図 3.25 710 nm の反射率で規格化した 700 - 760 nm タイタン反射率 (2021, 2022 年の観測)

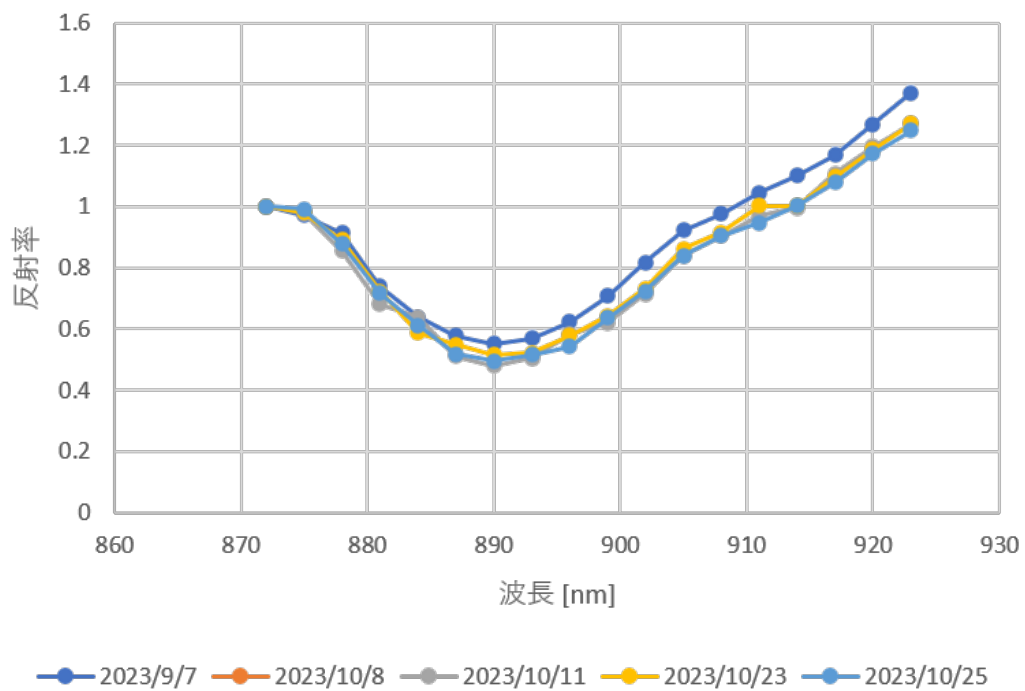


図 3.26 872 nm の反射率で規格化した 872 - 923 nm タイタン反射率. 889 nm のメタン吸収波長の反射率は観測日により多少変動がある.

3.2 RR 及び RDI

図 3.27 - 3.34 に 2023 年の各観測日での RR, RDI を示す.

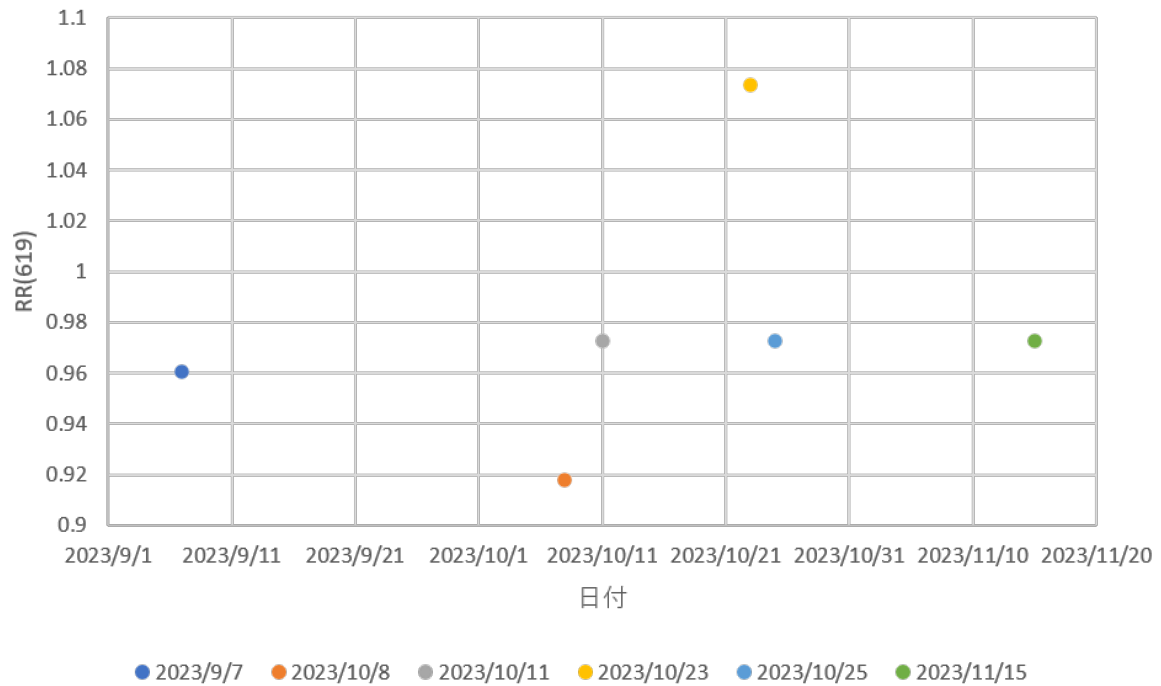


図 3.27 観測日毎の RR(619). 2023/10/23 の RR は基準の波長に対してメタン吸収波長の反射率の方が大きく、メタン吸収の影響を評価できない. 2023/09/07, 2023/10/08, 2023/10/25, 2023/11/15 はメタン吸収が観測された.

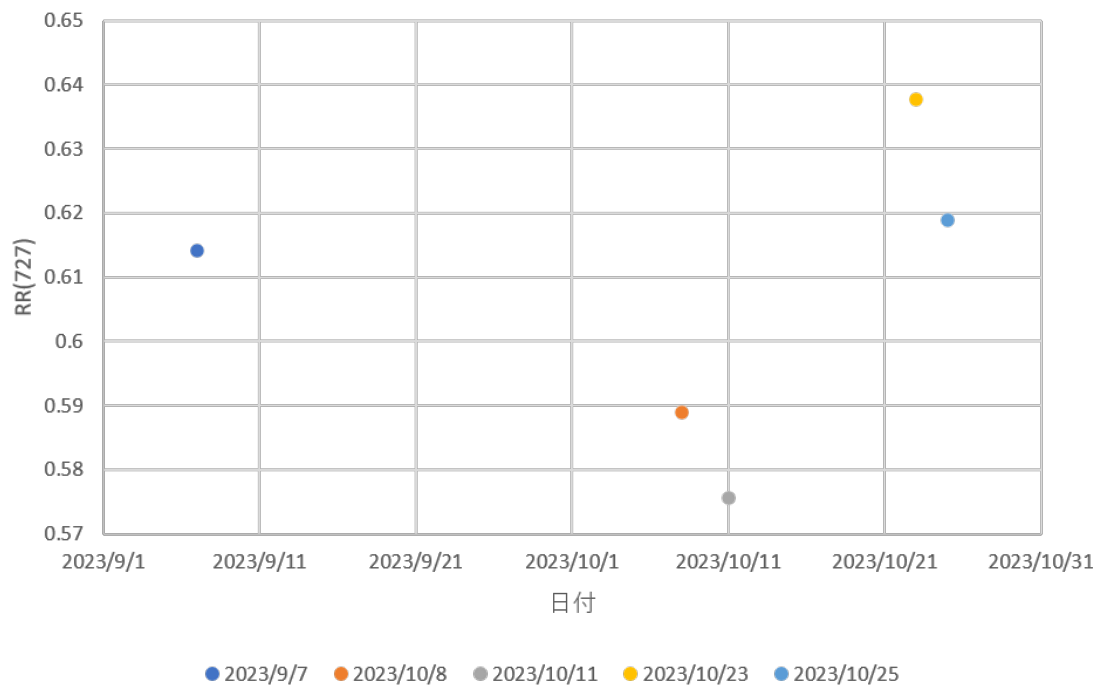


図 3.28 観測日毎の RR(727)(2023 年の観測). 2023/10/8, 2023/10/11 の RR(727) は相対的に小さく, メタン吸収波長で反射率が相対的に小さい.

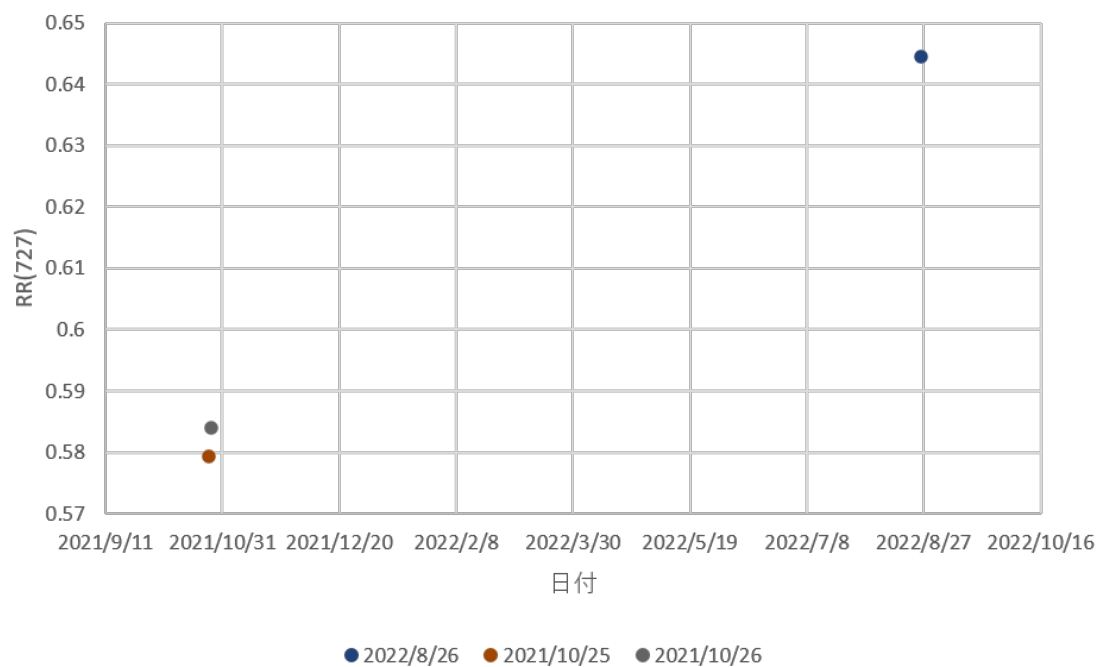


図 3.29 観測日毎の RR(727)(2021, 2022 年の観測). 2022/10/26 の RR は 2022/10/25 よりも大きく, 短時間スケールの変動が考えられる.

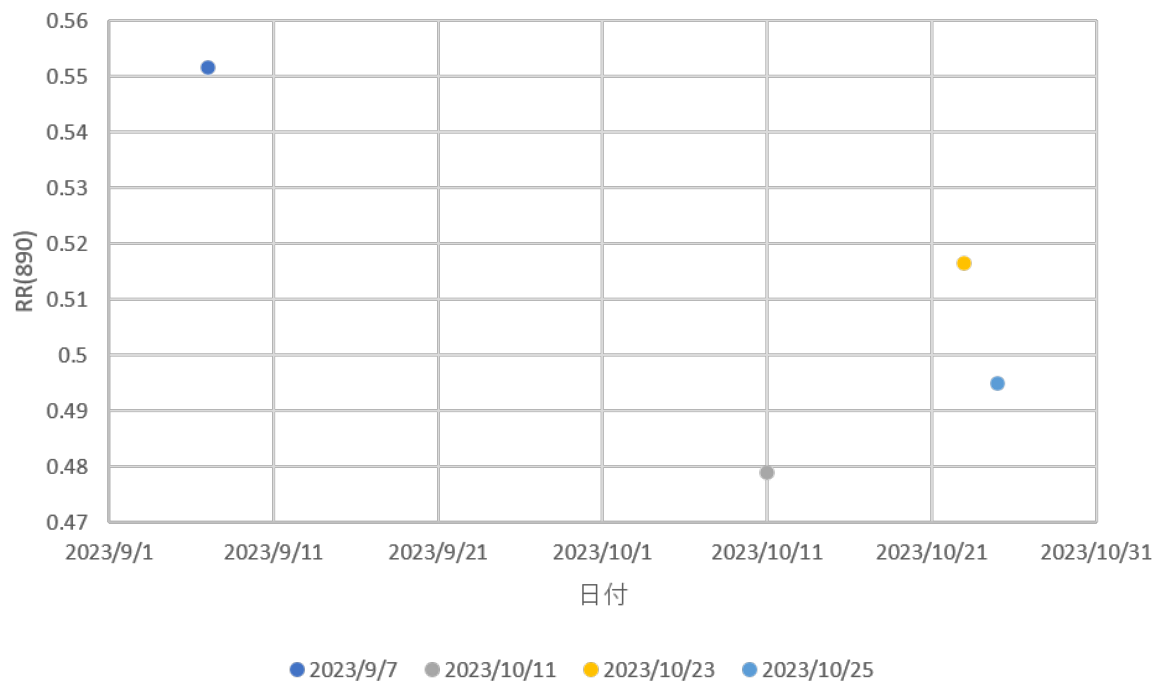


図 3.30 観測日毎の RR(890). 2023/09/07 の RR(890) は相対的に大きく、メタン吸収波長の反射率が相対的に大きい、RR(619), RR(727) とは異なる傾向である。

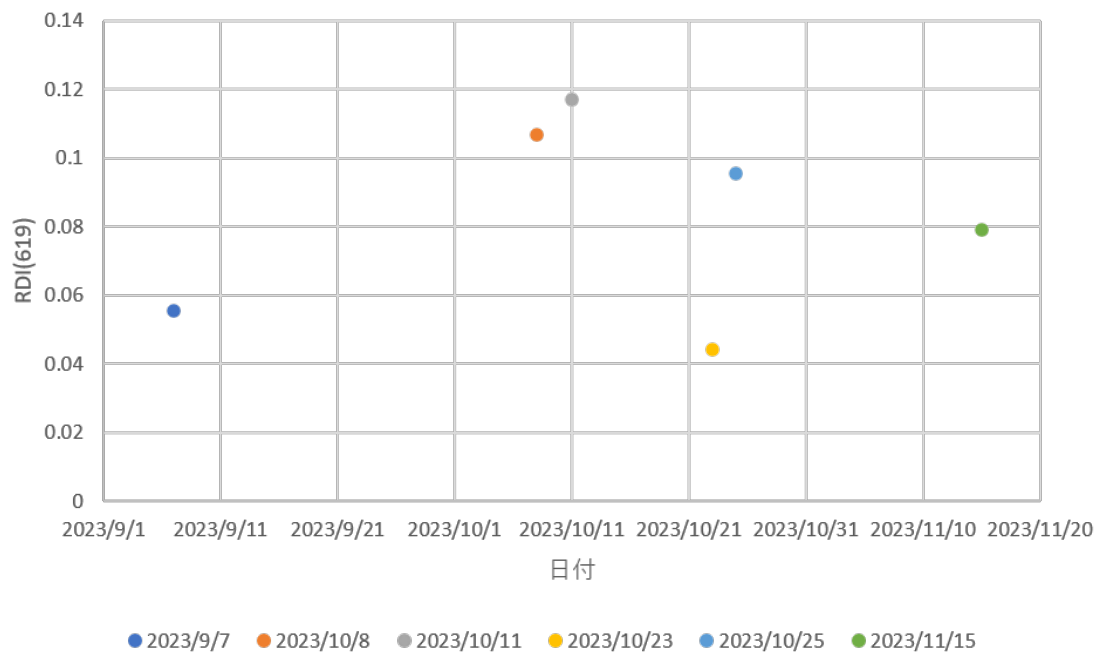


図 3.31 観測日毎の RDI(619). RR(619) と異なり 2023/10/23 のメタン吸収波長は基準より小さく、反射率は相対的に小さい。

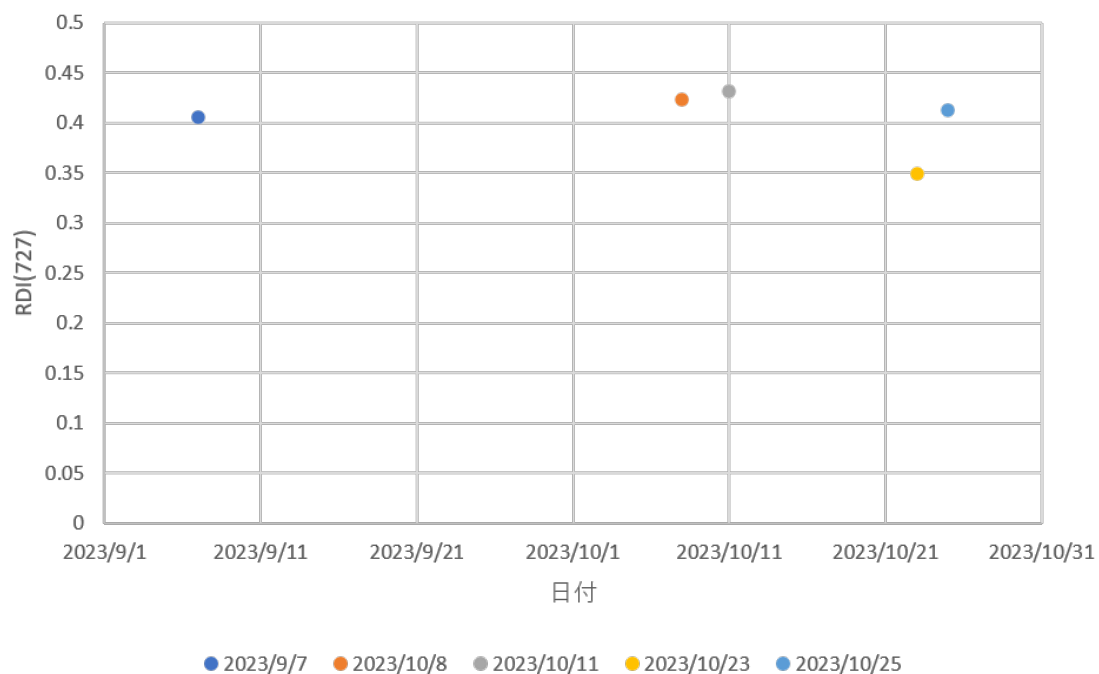


図 3.32 観測日毎の RDI(727)(2023 年の観測). 2023/10/23 の RDI は相対的に小さく、メタン吸収波長の反射率は相対的に小さい。

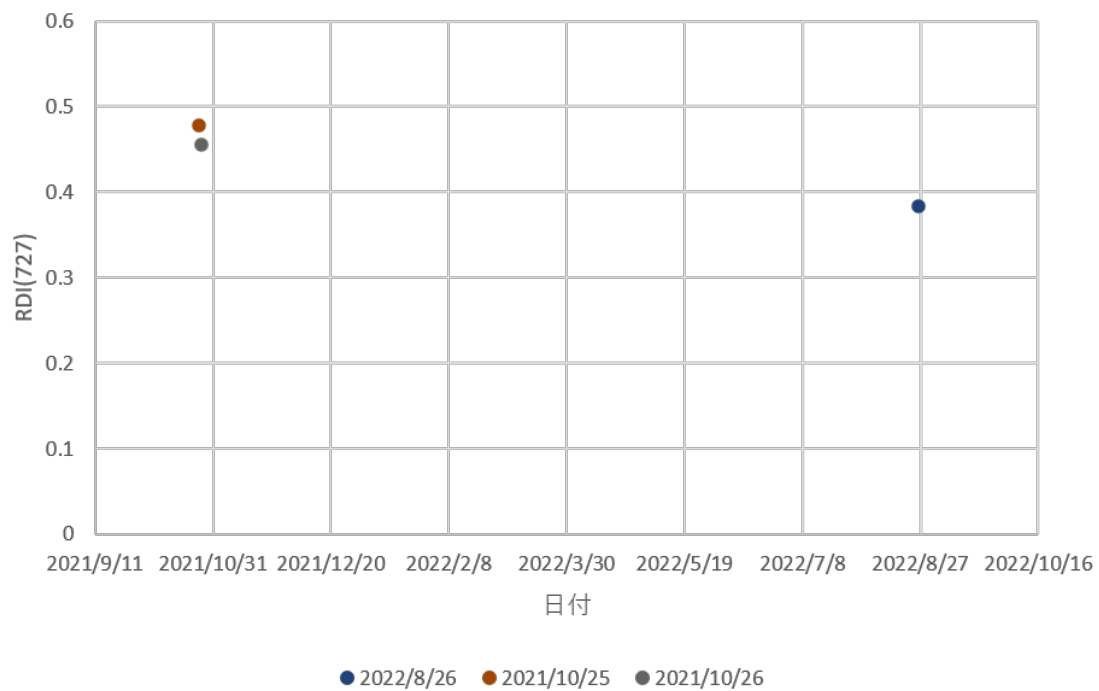


図 3.33 観測日毎の RDI(727)(2021, 2022 年の観測). 2022/10/26 の RDI は 2022/10/25 よりも小さく、短時間スケールの変動が考えられる.

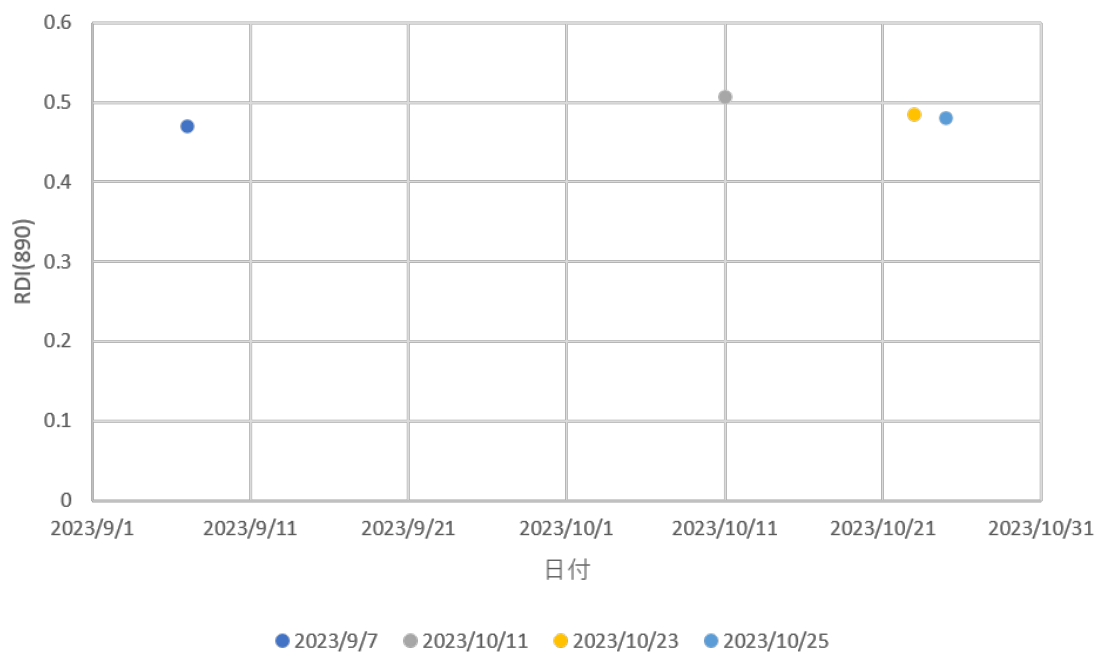


図 3.34 観測日毎の RDI(890). RDI(890) の値は変動が小さく、RDI(619), RDI(727) 及び RR(890) と異なり傾向が読み取りにくい.

図 3.35 - 3.38 に RR の大きさを縦軸，真近点角 (TA) を横軸にプロットした図を示す．727, 890 nm の RR は $TA > 180^\circ$ のとき減少する傾向がある．また 727 nm の RR は $TA < 180^\circ$ のとき増加する傾向がある

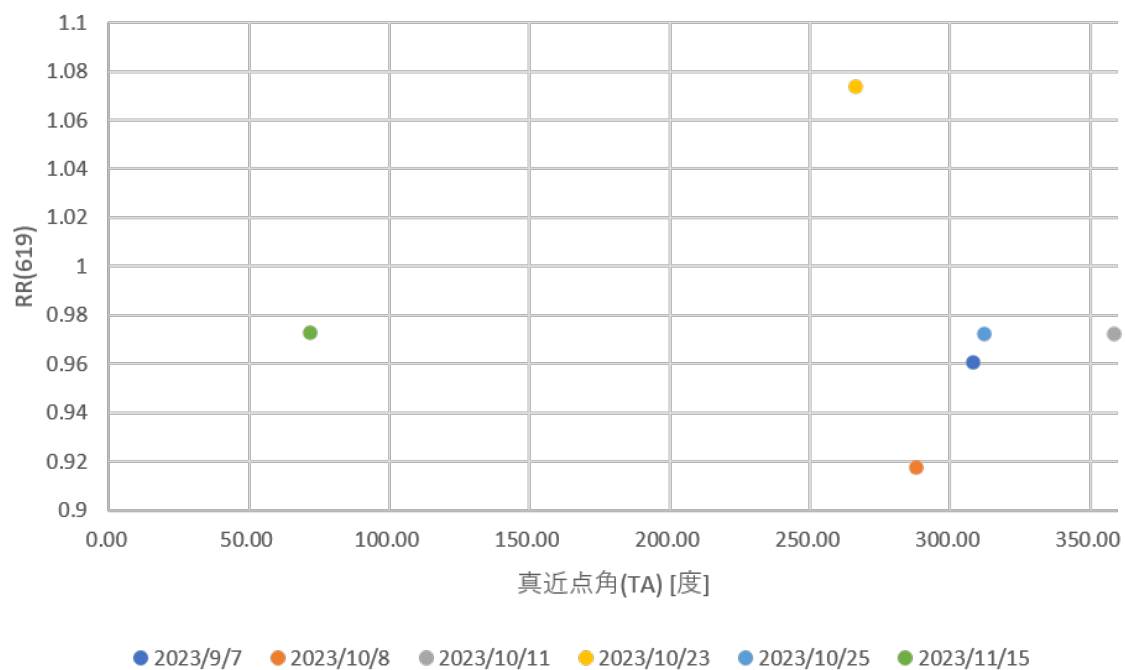


図 3.35 観測日の TA と RR(619)．2023/10/23 の RR は基準の波長に対してメタン吸収波長の反射率の方が大きく，メタン吸収の影響を評価できない．2023/09/07, 2023/10/08, 2023/10/25, 2023/11/15 はメタン吸収が観測された．

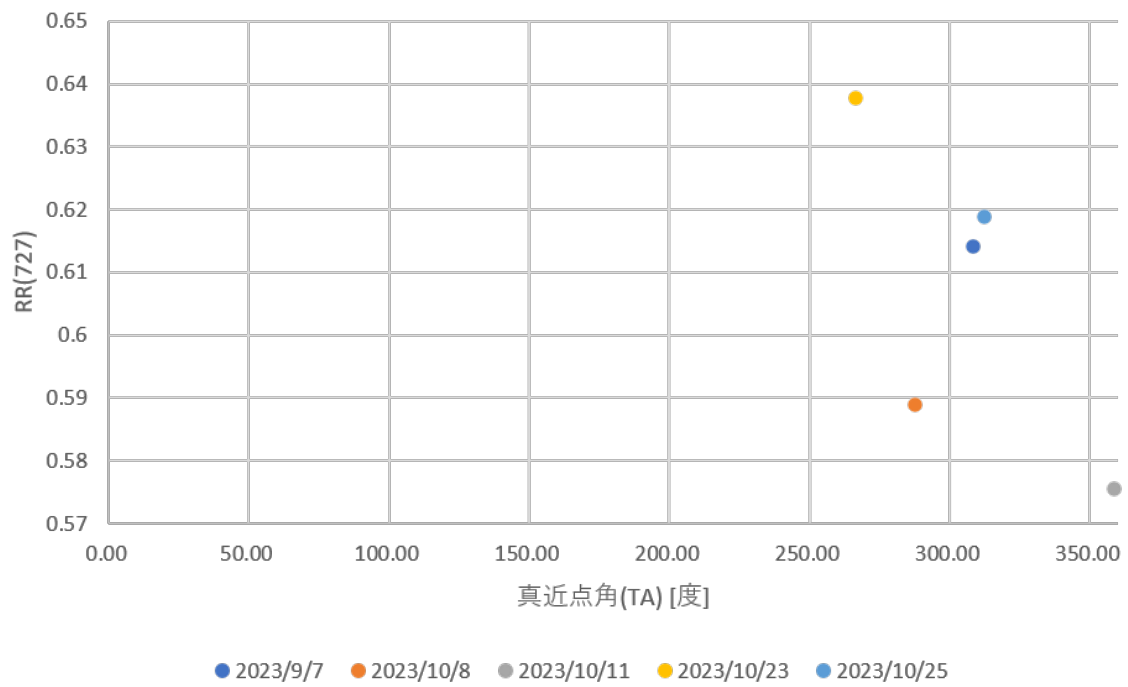


図 3.36 観測日の TA と RR(727)(2023 年の観測). TA が大きくなるほど RR が小さくなる.

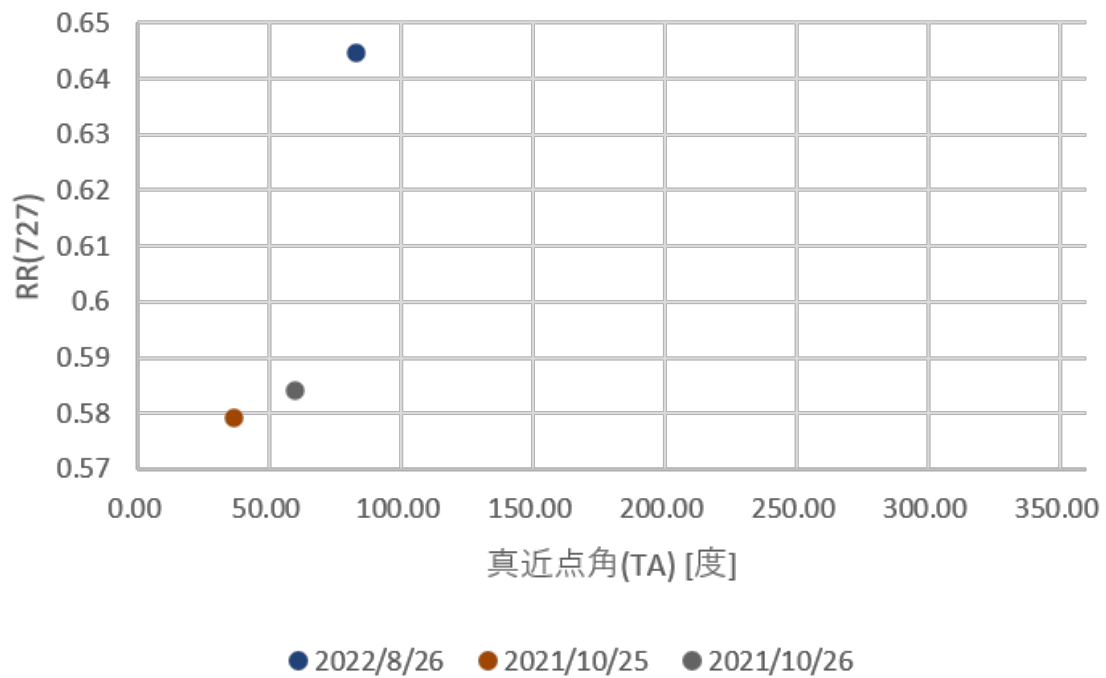


図 3.37 観測日の TA と RR(727) (2021, 2022 年の観測). TA が大きくなるほど RR が大きくなる.

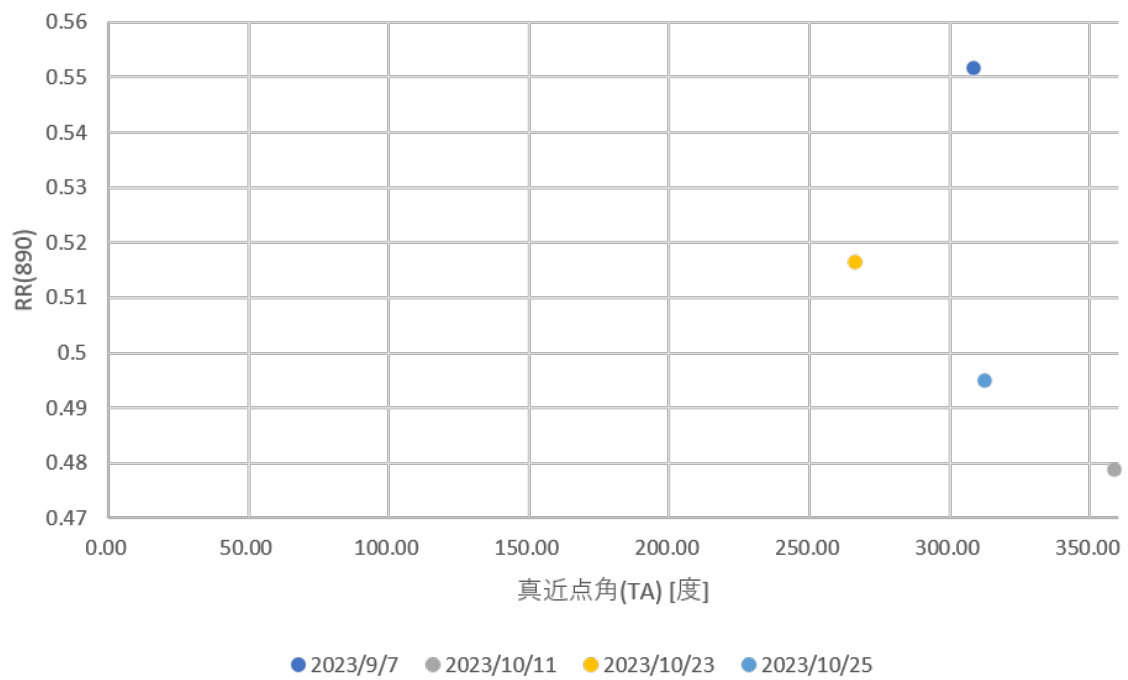


図 3.38 観測日の TA と RR(890). 2023/09/07 以外は TA が大きくなるほど RR が小さくなる RR(727) と同様の傾向がある.

図 3.39 - 3.42 に RDI の大きさを縦軸，真近点角 (TA) を横軸にプロットした図を示す．619, 727 nm の RDI は $TA > 180^\circ$ のとき増加する傾向がある．また 727 nm の RDI は $TA < 180^\circ$ のとき減少する傾向がある．この傾向は公転周期 (約 16 日) で生じ，複数回土星を公転しても周期的に生じる変動の可能性はある．

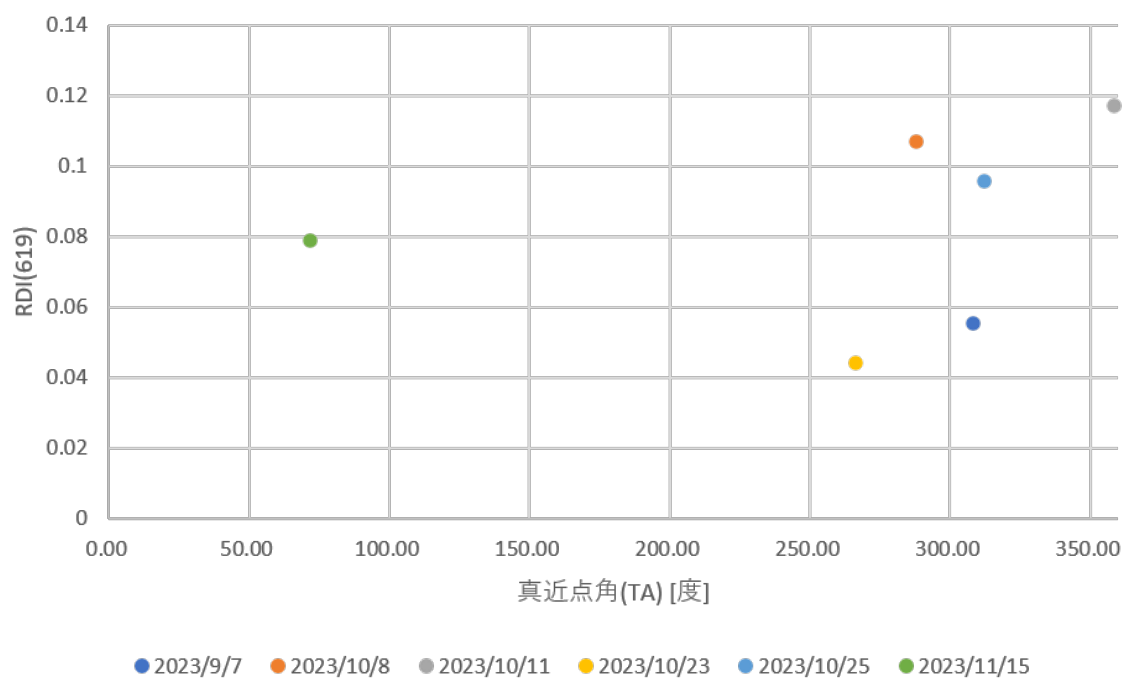


図 3.39 観測日の TA と RDI(619)． $TA > 180^\circ$ の観測日では TA が大きくなるほど RDI が大きくなる．

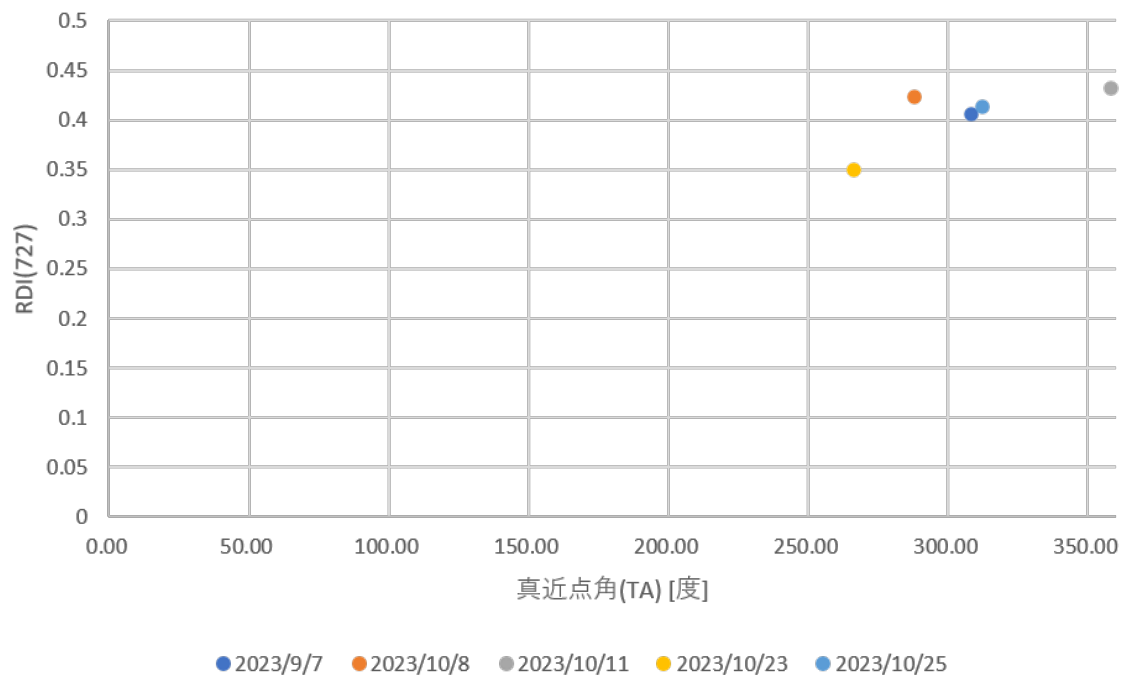


図 3.40 観測日の TA と RDI(727)(2023 年の観測). TA が大きくなるほど RDI が大きくなる. これは図 3.36 の RR の傾向と整合的である.

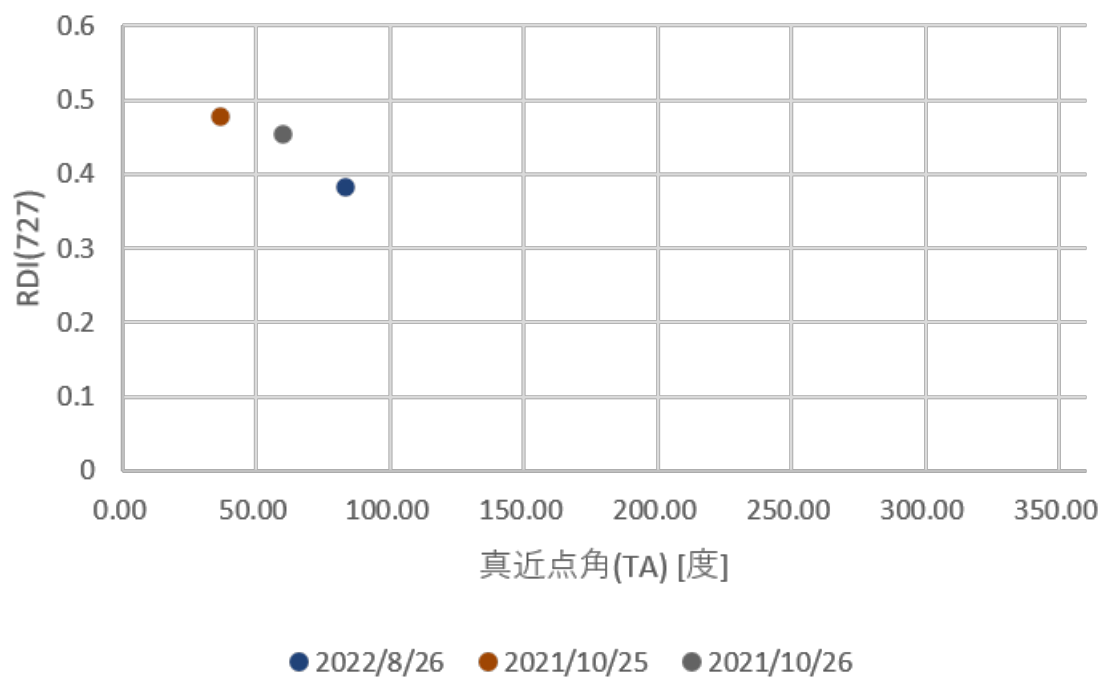


図 3.41 観測日の TA, RDI(727)(2021, 2022 年の観測). TA が大きくなるほど RDI が小さくなる. これは図 3.37 の RR の傾向と整合的である.

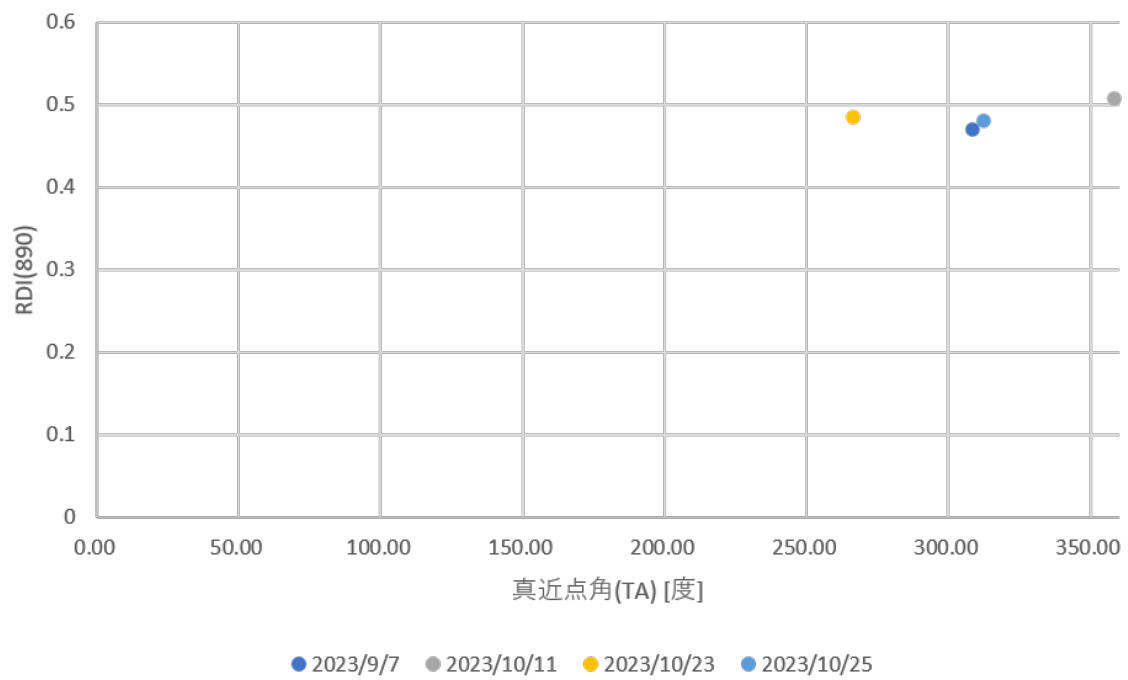


図 3.42 観測日の TA と RDI(890). RDI(890) の変動は小さく, 傾向は読み取れない.

2021-2023 年の 3 年間で、 $36.31^{\circ} < TA < 358.43^{\circ}$ の範囲で観測した。図 3.43 - 3.46 に 2021, 2022, 2023 年の 8 観測日における 727 nm の RR, RDI を TA 及び近日点離角でプロットした図を示す。

TA $<180^{\circ}$ のとき RR は増加, RDI は減少する傾向, $180^{\circ} < TA$ のとき RR は減少, RDI は増加する傾向がある。RR が減少, RDI が増加するときメタン吸収波長の反射率は減少しているので、タイタン大気は TA $=180^{\circ}$ のときメタン吸収波長の反射率が極小, TA $=0^{\circ}, 360^{\circ}$ のとき極大となる。この変動は公転運動に相関して生じている。2023/09/07(TA $=308.47^{\circ}$), 2023/10/25(TA $=312.28^{\circ}$) の RR,RDI から、複数回土星を公転しても周期的に生じる変動の可能性がある。

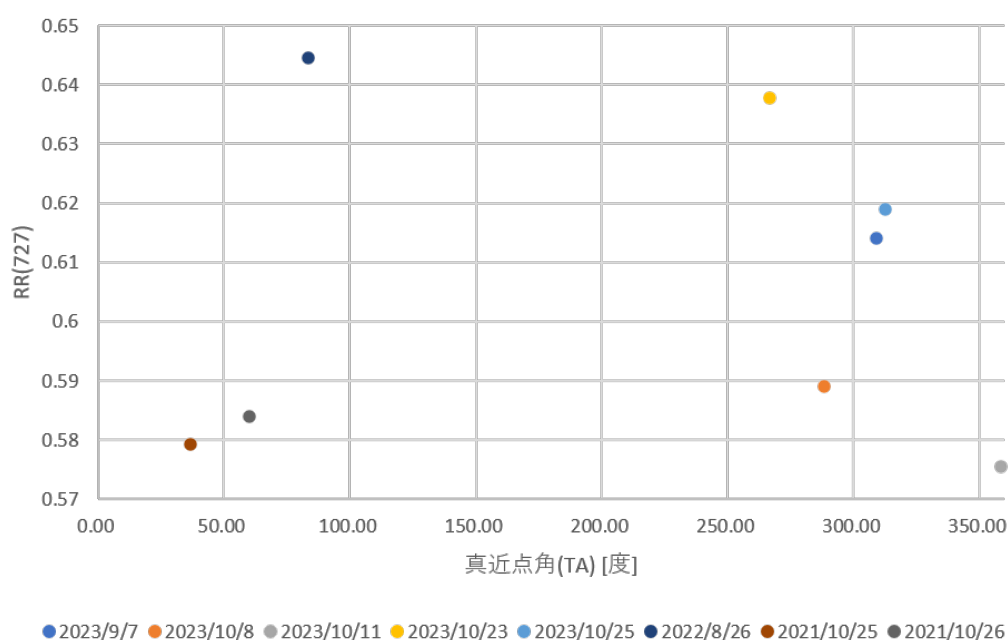


図 3.43 観測日の TA と RR(727)(2021, 2022, 2023 年の観測). TA $<180^{\circ}$ のとき RR は増加傾向, $180^{\circ} < TA$ のとき TA は減少傾向.

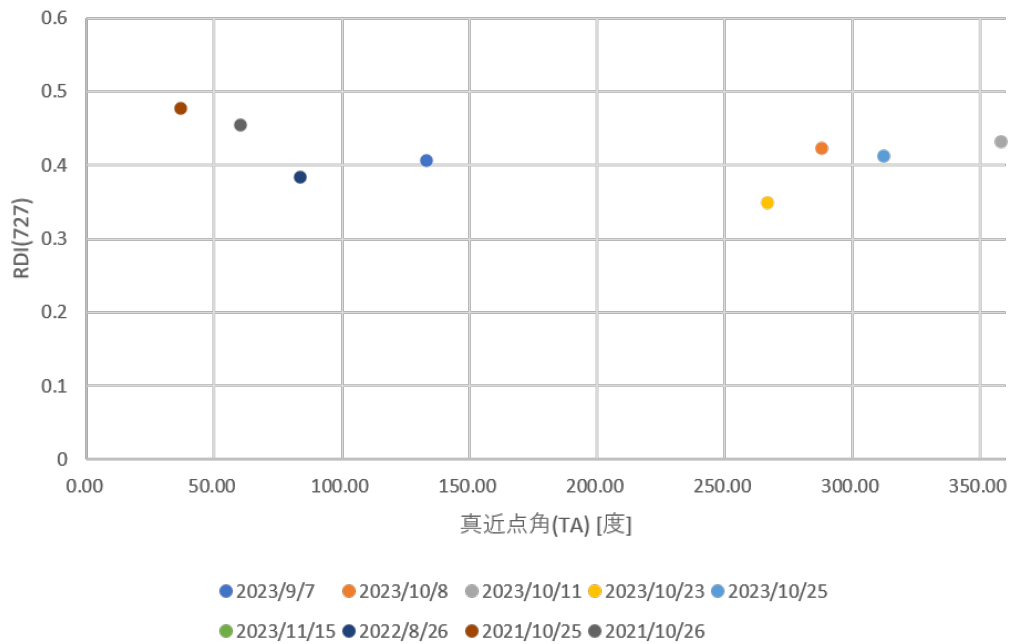


図 3.44 観測日の TA と RDI(727)(2021, 2022, 2023 年の観測). $TA < 180^\circ$ のとき RDI は減少傾向, $180^\circ < TA$ のとき増加傾向. この傾向は図 3.43 の RR の傾向と整合的である. 2023/09/07, 2023/10/25 は TA は近い値であるが, 39 日間の時間差があり, タイタンが土星を 3 回周回した前後の観測日である. 2023 年の観測は 3 周公転する間に 5 夜の観測日があり, TA に相関して RDI が変動している一方で, 同様の TA で RDI の値が近く周期性がある.

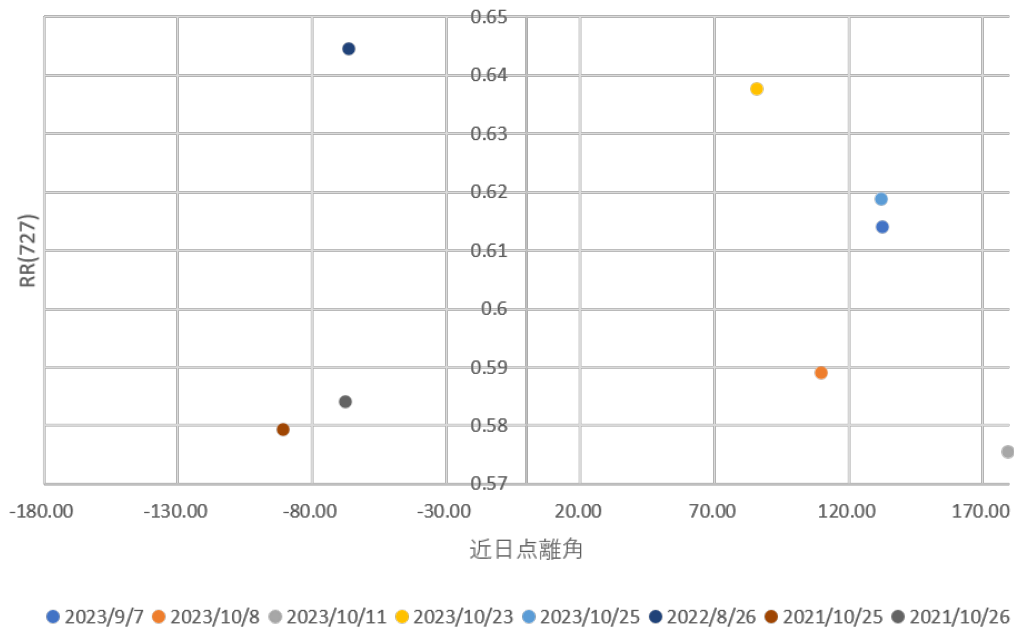


図 3.45 観測日の近日点離角と RR(727)(2021, 2022, 2023 年の観測). 2021/10/26 と 2022/8/26 の近日点離角は近い値であるが, RR(727) は約 0.05 異なる.

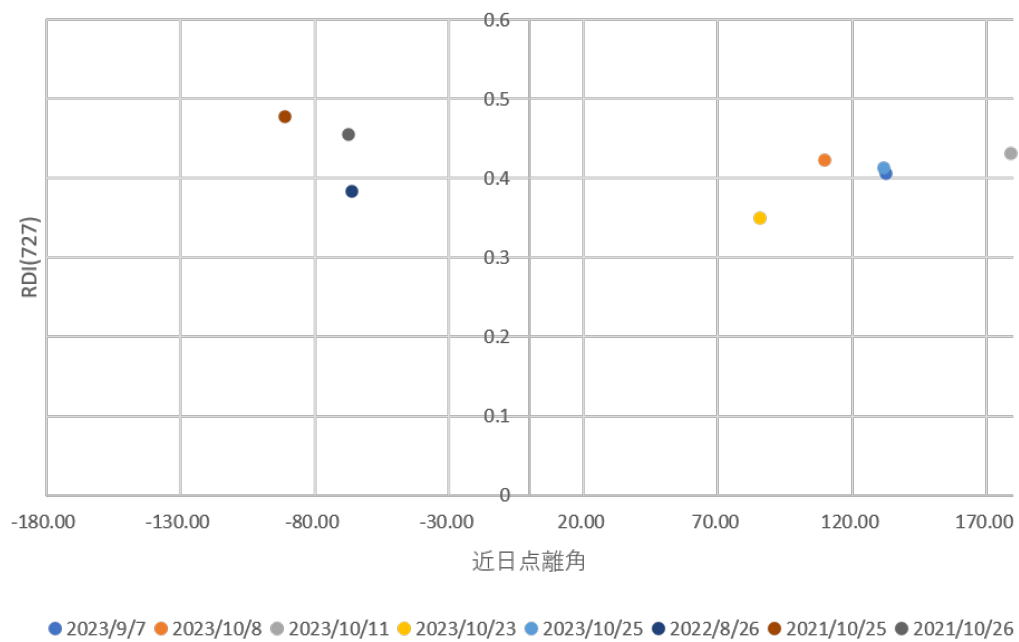


図 3.46 観測日の近日点離角と RDI(727)(2021, 2022, 2023 年の観測). 2021/10/26 と 2022/8/26 の近日点離角は近い値であるが, RDI(727) は 0.07 異なる.

4 議論

タイタン大気のメタン濃度には真近点角と関係した変動の存在が考えられる．観測期間中におけるタイタンの位置について，タイタン公転軌道上の近日点及び土星磁気圏との位置関係を検討する．RR, RDI の変動を生じさせるメカニズムについて，メタンの経度分布，太陽フラックスの変動，土星磁気圏の影響，ヘイズ層の高度変動の点から検討する．

4.1 タイタン，土星の位置関係及び土星磁気圏の形状

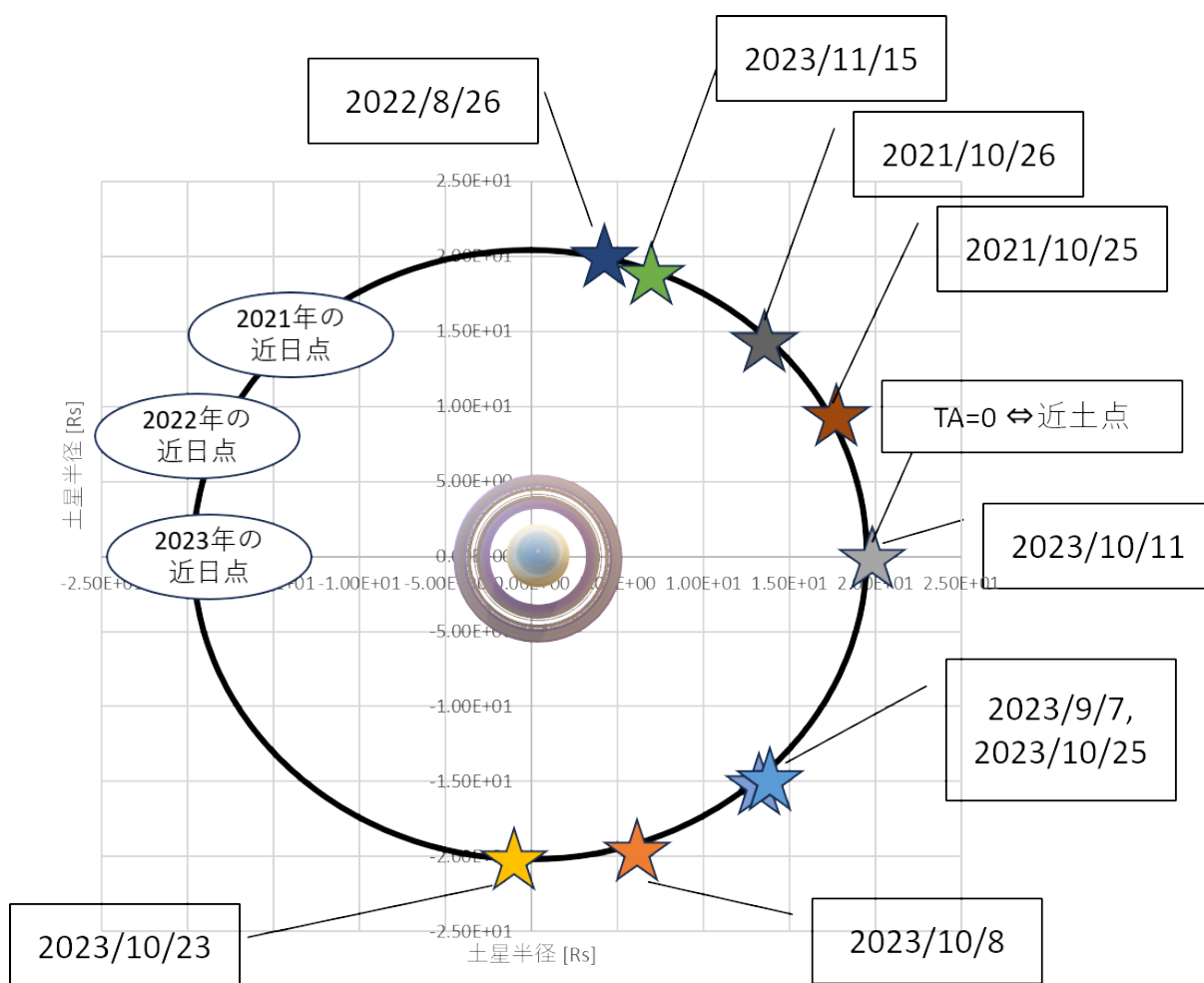


図 4.47 タイタン，土星，近日点の位置関係．土星を天の北極方向から見た図であり，黒色の線はタイタンの軌道．タイタンは反時計回りに公転運動をする．観測日のタイタンの位置を星型で示す．

図 4.47 に観測日におけるタイタンの位置，近日点の位置を示す．タイタンの真近点角 (TA)，近日点の TA は表 2.10, 表 2.11, 表 2.12 で示したとおりである．観測日前後で近日点は 2021 年は $TA = 127.32^\circ$ ，2022 年は $TA = 149.35^\circ$ であった．2023 年の観測日前後では近日点は TA が $175.73^\circ - 181.44^\circ$ の範囲にあった．地球

方向と太陽方向はほぼ一致している。

図 4.48 は土星磁気圏とタイタン軌道の概念図である。土星磁気圏は太陽風の圧力を受けて、太陽側で圧縮され対太陽側では尾状に広がる形状である。磁気圏内には高エネルギー粒子が豊富に含まれるプラズマシートがある。近日点の TA は 2021 年の観測日前後では 127.32° 、2022 年の観測日前後では 149.35° 付近であるので、観測日のタイタンはプラズマシートの外にあったと考えられる。2023 年の観測期間前後では近日点の TA は 180° 付近であるので、TA= 180° 前後ではタイタンはプラズマシートの外にあり、TA= 0° 前後ではプラズマシート内にあったと考えられる。

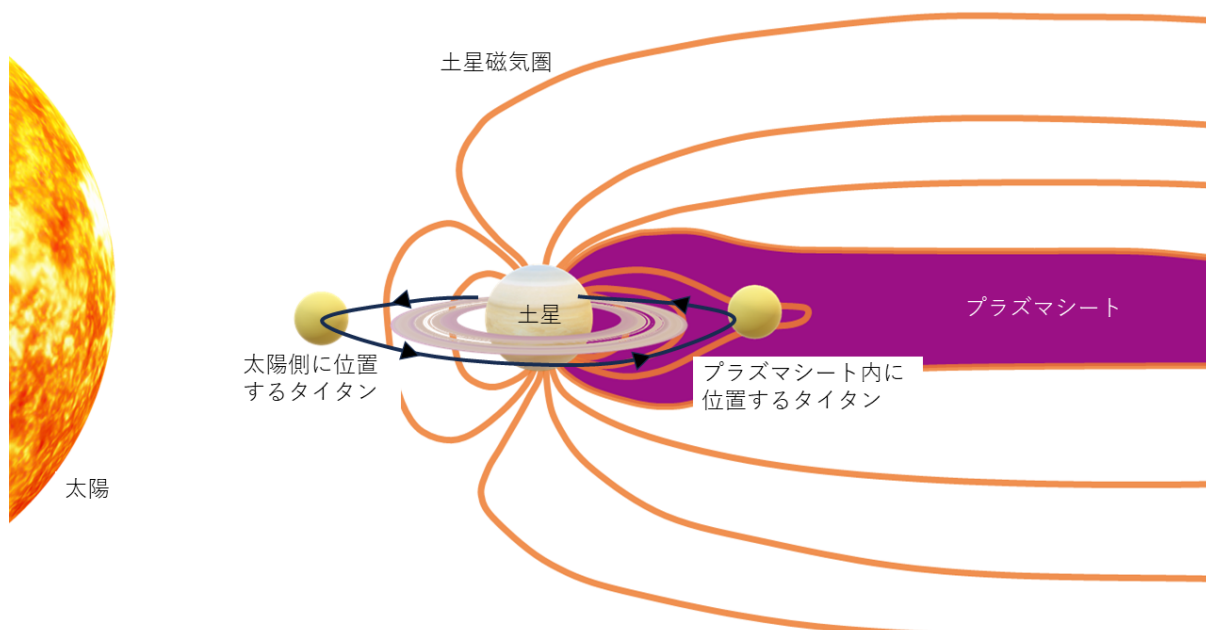


図 4.48 土星磁気圏とタイタン軌道の位置関係。タイタンは対太陽側でプラズマ密度が高いプラズマシートに入る。

4.2 RR, RDI の変動メカニズムに関する仮説

RDI は近日点離角でプロットしたとき、近日点離角= 0° のとき極小、近日点離角= $\pm 180^\circ$ のとき極大となる傾向が見られる (図 4.49 の矢印)。すなわち、近日点離角= 0° のときメタン量は極大、近日点離角= $\pm 180^\circ$ のときメタン量は極小となる。

タイタンの公転運動と関係し、周期性のある変動が生じるメカニズムについて、タイタン地表の影響、太陽フラックスの変動、土星磁気圏の影響の 3 つの仮説を立てた。

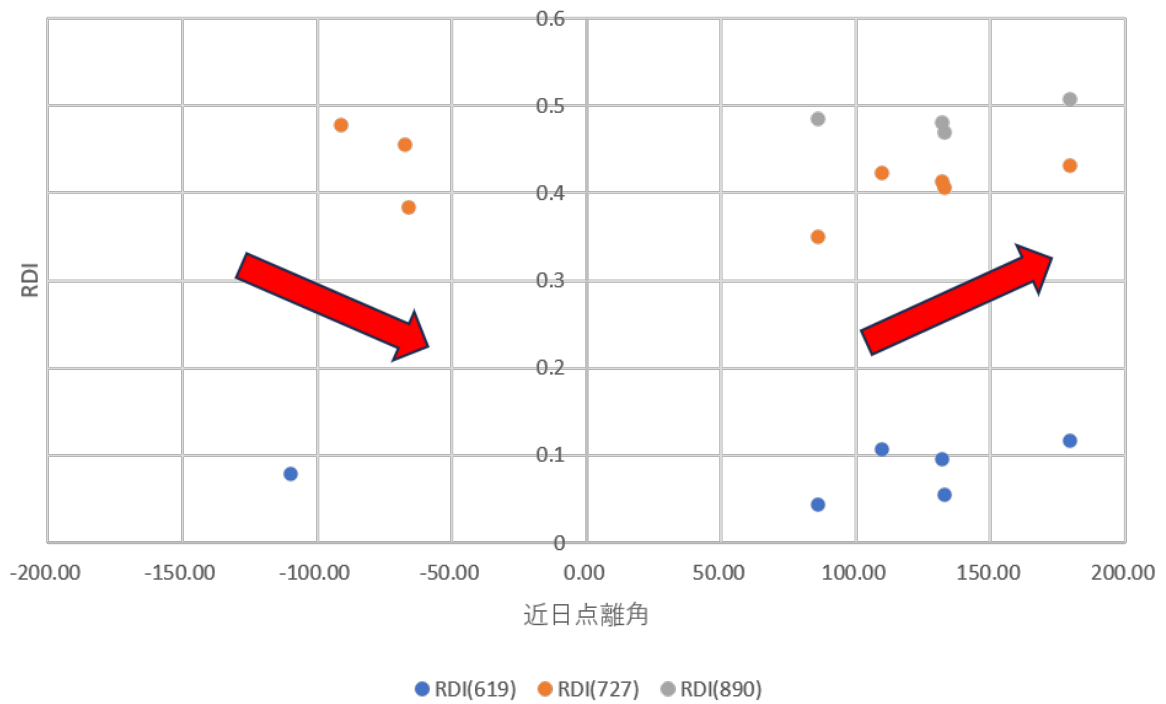


図 4.49 RDI の傾向 (赤矢印). RDI(727)(橙色) は近日点離角=0° を軸に, 近日点離角 < 0° では単調減少, 近日点離角 > 0° では単調増加の傾向がある. RDI(619)(青色) は近日点離角 > 0° で単調増加の傾向がある. RDI(890)(灰色) は傾向がない. 土星磁気圏は対太陽側にプラズマシートを持つことから, 近日点離角=0° 付近でタイタンはプラズマシート外, 近日点離角=± 180° 前後でプラズマシート内に位置すると考えられる.

4.2.1 メタンの経度分布

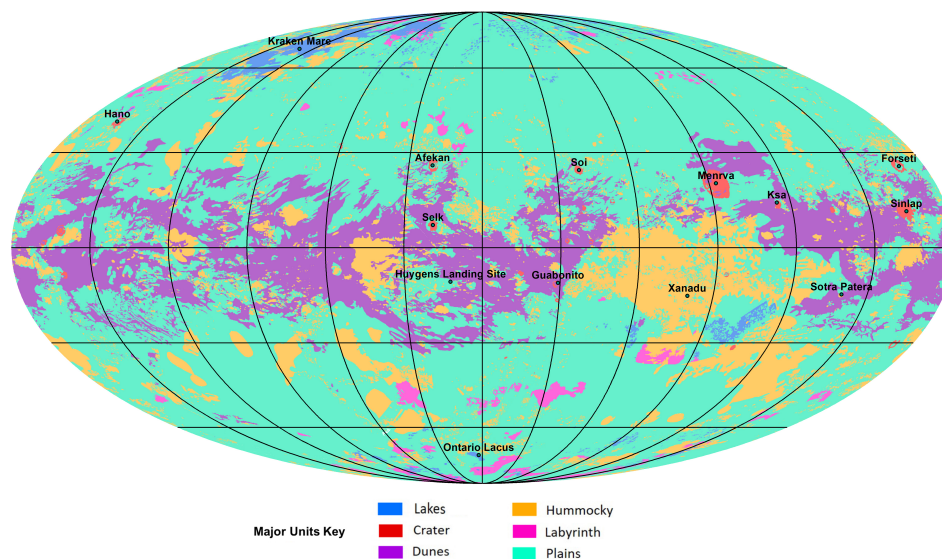


図 4.50 タイタンの全球地質図. 最大の湖は北半球に存在する. PIA23174. Credit: NASA/JPL-Caltech/ASU

RR, RDI が変動した理由として, メタンの経度分布に偏りがある影響が考えられる.

メタンの湖は北半球に集中しており, 経度分布にも偏りがある (図 4.50). 自転と公転が同期していることから, $TA < 180^\circ$ と $TA > 180^\circ$ では異なる半球を観測することになる. 地球から見える湖の面積により, RR, RDI が変動している可能性が考えられる. また湖の影響を受け, 対流圏のメタン濃度が不均一な可能性も考えられる. 対流圏のメタン濃度は Huygens 探査機によるその場観測の一例しかないので経度分布は明らかでない.

ヘイズを通過しタイタン表面と下層大気が観測可能な波長は, 1000-2500 nm であるため [Roe, 2012], 600-923 nm で観測した本研究に地表と対流圏の影響があるかどうか検討が必要である.

4.2.2 太陽フラックス

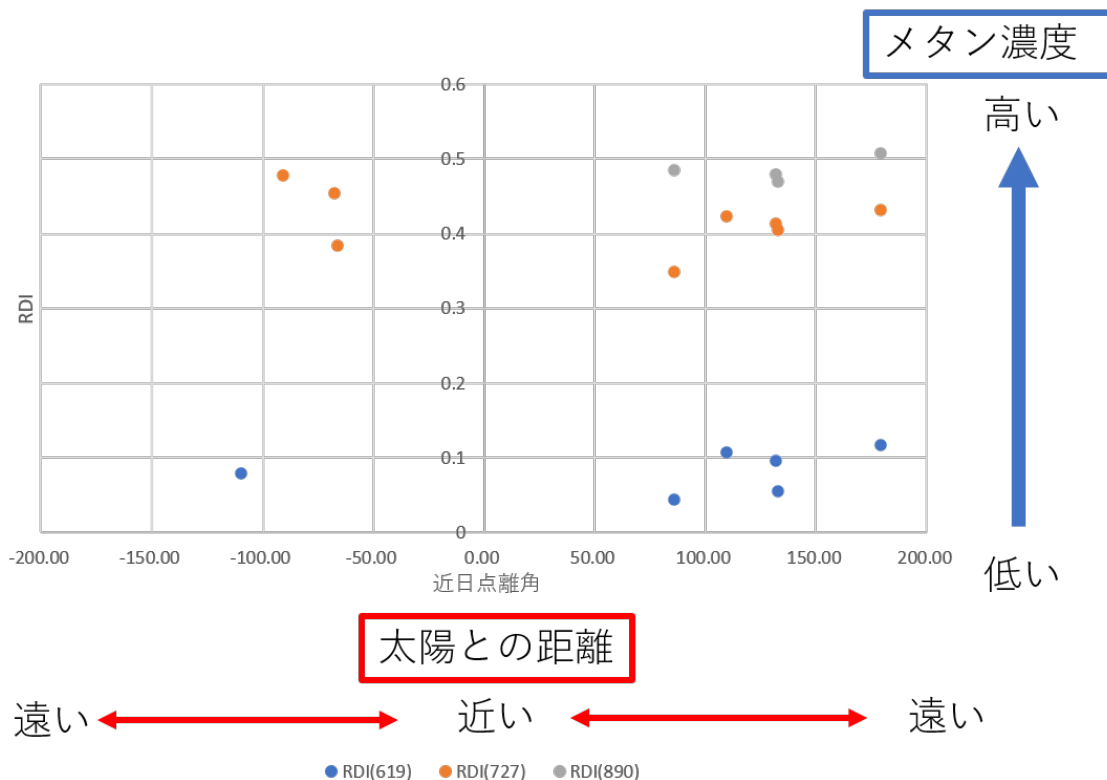


図 4.51 タイタンと太陽の距離とメタン濃度の関係. 近日点離角の絶対値が大きくなると RDI が大きい, すなわちメタン濃度が高い傾向がある. 近日点離角の絶対値が大きいほどタイタンと太陽の距離は遠くなる.

タイタンの公転運動により太陽との距離が変化することでメタン濃度が変動した可能性が考えられる. 太陽光により熱圏, 中間圏ではメタンが光分解される (式 (12)). 解離したメタンはヘイズ層のソリンを生成する化学反応プロセスをすすむ [Waite et al., 2007]. したがって, 近日点に近づくことでメタンが解離し大気中のメタン濃度が減少する可能性がある. またソリンが生成されることでヘイズ層の密度が増すことが考えられる.



成層圏, 対流圏からメタンが供給されることを想定すると, 光分解による減少量が低下すると, 相対的に中間圏, 熱圏のメタン濃度が上昇する. したがって, 近日点から遠日点に移動することでメタン吸収波長の反射率が低下すると考えられる.

2021-2023 年の観測において, 近日点から離れるにつれて RR は減少, RDI は増加する傾向がある. これは太陽から離れることでメタン濃度が上昇する仮説と整合的である. タイタンの公転運動により太陽フラックスはおおよそ 0.21% の変動する. メタン濃度の変動に十分なフラックスの変動かどうか検討する必要がある.

4.2.3 土星磁気圏

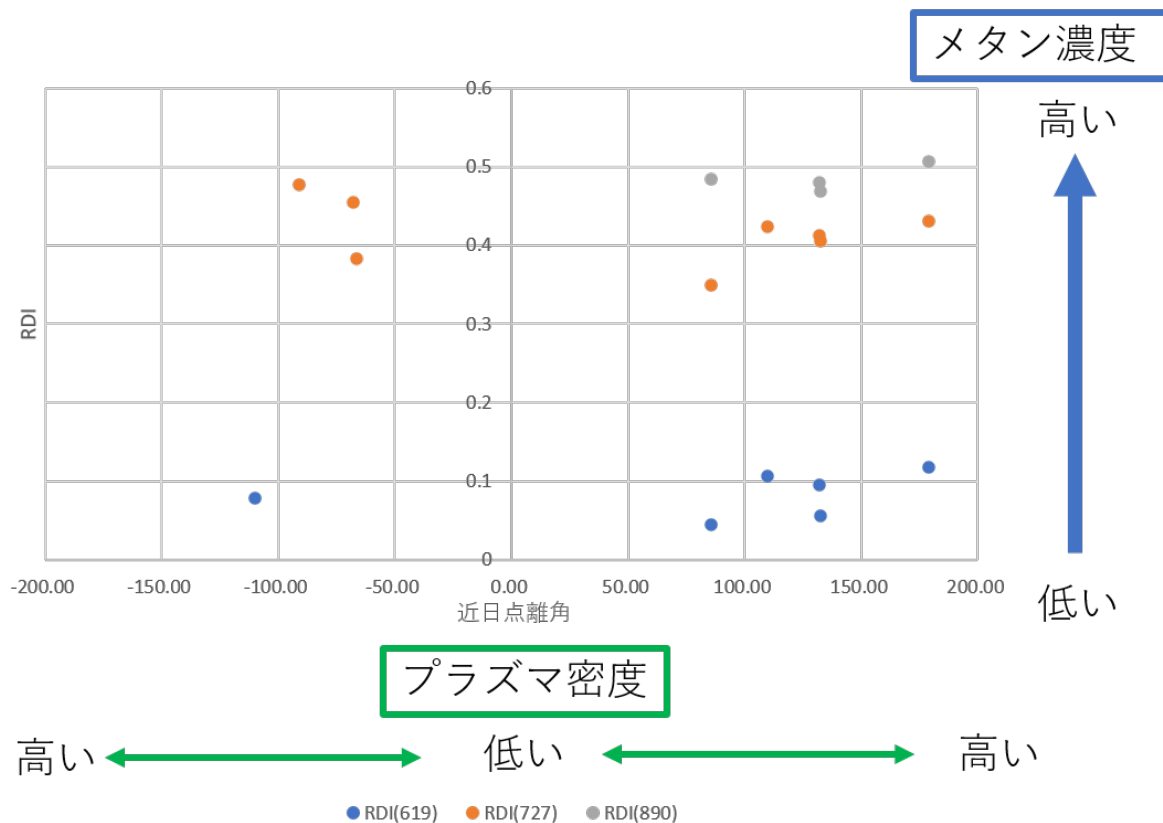


図 4.52 タイタンと土星磁気圏のプラズマ密度の関係。近日点離角の絶対値が大きいほどタイタンは対太陽側に位置しプラズマ密度の高いプラズマシートの内側にある。

タイタン大気は土星磁気圏の影響を受けており、磁気圏の高エネルギー粒子はメタンを電離させる (式 (13))[Waite et al., 2007].



電離したメタンはソリンとなる化学反応プロセスをすすむ。プラズマシート内で、ソリンが生成されるプロセスが加速する場合、近日点離角 $>0^\circ$ のとき近日点離角が増加するにつれてメタンは減少する。この想定は図 4.49 と矛盾する。

一方で高エネルギー粒子により、有機物が熱分解または放射線分解しメタンが生成する可能性がある。高エネルギー粒子は熱圏の加熱することから、プロパンなどの有機物が熱分解し、メタンが生成される可能性が考えられる。放射線分解によるメタン生成は、高エネルギー粒子の密度が高いプラズマシートで活発に生じる可能性がある。有機物が熱分解または放射線分解によりメタンを生成すると仮定すると、図 4.49 と整合的な傾向である。

4.2.4 ヘイズの高度変化

ヘイズ層の高度が変動することで見かけの大気の厚さが変動する。メタン濃度が高度依存することを仮定すると、短時間スケール変動を説明できる可能性がある。

光学的に厚いヘイズ層の高度が上昇すると、見かけの大気は薄くなる。メタンは高度が低いほど濃度が高いと仮定すると、ディタッチドヘイズ層の上昇により、観測されるメタン量が減少する (図 4.53)。観測されるメタン量が減少すると、メタン吸収波長の反射率は増加するため、図 4.49 の傾向は、 $TA > 180^\circ$ のとき TA が増加するにつれてディタッチドヘイズ層の高度が上昇したと想定される。1.2 節で述べたとおり 2 つのヘイズ層のうち、ディタッチドヘイズ層は季節により高度が変動している [West et al., 2011; Koskinen et al., 2011]。しかしながら、季節変動より短いスケールでのディタッチドヘイズ層の高度変化は未解明であり、高度変化のメカニズムについて検討する必要がある。

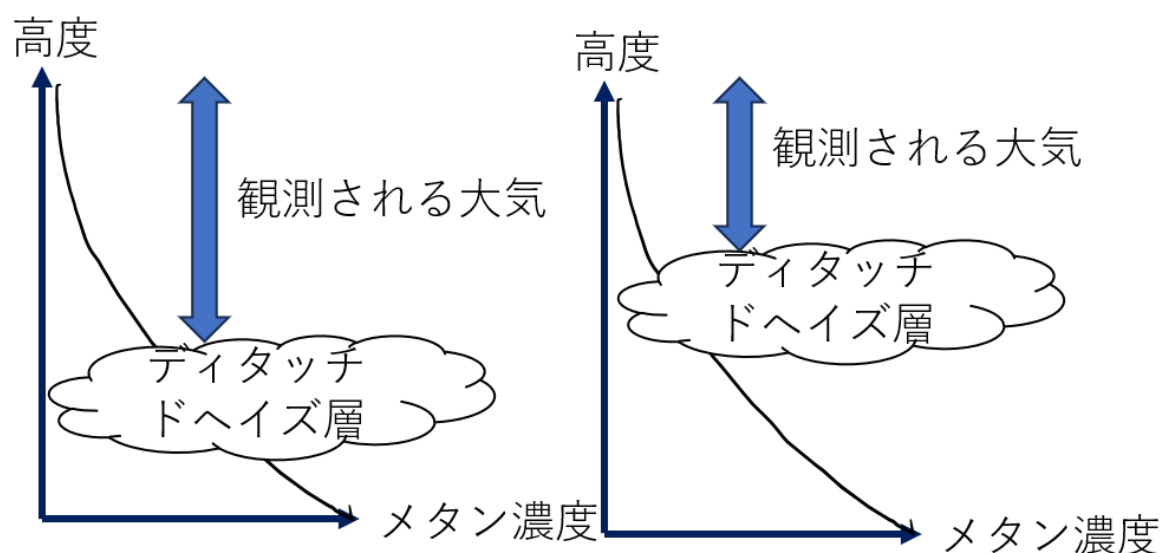


図 4.53 ディタッチドヘイズ層の高度変化の概念図。縦軸は高度、横軸はメタン濃度、黒線は高度によるメタン濃度。ディタッチドヘイズ層の高度が低い場合 (左) と高度が高い場合 (右) メタン濃度が低高度ほど大きいと仮定した場合、観測される大気は、ディタッチドヘイズ層の高度に依存し、ディタッチドヘイズ層の高度が高い方 (右) が、メタン量が小さくメタン吸収波長の反射率が大きく観測される可能性がある。

5 結論

タイタン大気の時間変動は

1. 長時間スケールの時間変動: 土星公転周期 (約 30 年周期) に起因する季節変動
2. 太陽周期活動 (約 11 年周期) に起因する変動
3. 短時間スケールの時間変動: タイタン公転周期 (約 16 日周期) に起因する変動と対流圏の活動

の 3 種類が知られている。

タイタンのメタン吸収波長はヘイズ層の影響が知られている一方で、短時間スケール変動については明らかにされていない。太陽光と土星磁気圏の高エネルギー粒子によりメタンが分解されているタイタン大気において、メタン吸収波長に短時間スケール変動が存在するかどうか地上望遠鏡による観測を試みた。

本研究では 2021 年 8 月, 2022 年 10 月, 2023 年 9-11 月に、北海道大学大学院理学研究院附属天文台ピリカ望遠鏡を用いてタイタンのメタン吸収波長 (619, 727, 889 nm) の前後の波長域を観測した。メタン吸収波長におけるタイタンの反射率を、日付、真近点角 (TA) 及びタイタンの近日点からの離角で解析した。メタン吸収量の指標として RR(Reflectance Ratio), RDI(Reflectance Delta Index) を定義した。

RR, RDI は TA, 近日点離角で傾向を持つ。619, 727 nm の RR は $TA > 180^\circ$ のとき減少の傾向を持つ。619, 727 nm の RDI は $TA > 180^\circ$ のとき増加の傾向を持つ。以上の傾向は $TA > 180^\circ$ のときメタン吸収波長の反射率が減少する傾向を示唆している。727 nm の RR は $TA < 180^\circ$ のとき増加の傾向を持つ。727 nm の RDI は $TA < 180^\circ$ のとき減少の傾向を持つ。この傾向は $TA < 180^\circ$ のときメタン吸収波長の反射率が増加する傾向を示唆している。TA と近日点離角のプロットで明瞭な差は生じなかった。一方で 890 nm の RR は 619, 727 nm と同様の傾向が見えるが、RDI の傾向は見られなかった。

RR, RDI の傾向から、タイタン大気は公転運動に関係して、メタン吸収波長の反射率が短時間スケールで変動する可能性がある。727 nm の RR, RDI から推測される変動は、近土点付近でメタン量が多く、遠土点付近でメタン量が少なくなる変動である。このような変動を生じるメカニズムとして

1. 太陽フラックスが減少することで光分解が低調になり相対的にメタン量が増加した。
2. 土星磁気圏の高エネルギー粒子により有機物が分解されメタンが増加した。
3. ディタッチドヘイズ層の高度が変動することにより、見かけのメタン量が変動した。

の 3 つの仮説が考えられる。

本研究では仮説を検証するに至らず、また 9 夜の観測結果しか解析できなかった。今後の研究課題として、モデルと比較した仮説の検討とさらなる観測が必要である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々にお世話になりました。

指導教員の高木聖子講師には、ピリカ望遠鏡の操作方法から科学的な目標設定まで、非常に多くのご指導を頂きました。また 2021, 2022 年にタイタンを観測したデータをご提供頂きました。高木聖子講師の支えにより卒業研究を行うことができたました。ここに深謝の意を表します。

高橋幸弘教授には解析手法、変動メカニズムについてご助言を頂きました。

斎藤大晶特任助教のご支援によりピリカ望遠鏡による観測を行えました。

大阪大学大学院理学研究科の木村淳助教には本研究の考察にご助言を頂きました。

名寄市立天文台の内藤博之様をはじめ、同天文台の職員の方々には観測に対して多くのご支援を頂きました。

探査観測ユニットのメンバーには多くのアドバイスを頂きました。教員の佐藤光輝教授、久保田尚之特任准教授から頂いたご指摘、先輩の大野辰遼様、杉山玄己様、天田耕太郎様、田沼雄太様のアドバイス、同期の金野敦君、田中大誠君、前田壮太君の支えもあり研究を進めることができました。

宇宙惑星グループの皆様には研究室の垣根を超えて多くのアドバイスを頂き研究生活を支えて頂きました。

最後に私の家族に感謝の意を表します。家族の絶え間ないサポートと励ましのおかげで、私はこの卒業研究を完成させることができました。

お世話になりましたすべての方々にこの場を借りてお礼を申し上げます。

参考文献

- Ádámkovics, M., Barnes, J. W., Hartung, M., and I. de Pater (2010), Observations of a stationary mid-latitude cloud system on Titan, *Icarus*, **208**(2), doi:10.1016/j.icarus.2010.03.006
- Gombosi, T. I., Armstrong, T. P., Arridge, C. S., Khurana, K. K., Krimigis, S. M., Krupp, N., Person, A. M., and M. F. Thomsen, "Saturn's Magnetospheric Configuration". Saturn from Cassini-Huygens. Dougherty, M. K., et al. (eds.), Springer, 2009, p. 203-255.
- Hörst, S. M. (2017), Titan's atmosphere and climate, *Journal of Geophysical Research: Planets*, **122**(3), doi:10.1002/2016JE005240.
- Koskinen, T. T., Yelle, R. V., Snowden, D. S., Lavvas, P., Sandel, B. R., Capalbo, F. J., Benilan, Y., and R. A. West (2011), The mesosphere and thermosphere of Titan revealed by Cassini/UVIS stellar occultations, *Icarus*, **216**(2), doi:10.1016/j.icarus.2011.09.022.
- Lorenz, R. D., Smith, P. H., Lemmon, M. T., Karkoschka, E., Lockwood, G. W., and J. Caldwell (1997), Titan's North – South Asymmetry from HST and Voyager Imaging: Comparison with Models and Ground-Based Photometry, *Icarus*, **127**(1), doi:10.1006/icar.1997.5687.
- Roe, H. G., Bouchez, A. H., Trujillo, C. A., Schaller, E. L., and M. E. Brown (2005), Discovery of Temperate Latitude Clouds on Titan, *The Astrophysical Journal*, **618**(1), doi:10.1086/427499
- Roe, H. G. (2012), Titan's Methane Weather, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **40**, doi:10.1146/annurev-earth-040809-152548.
- Schaller, E. L., Brown, M. E., Roe, H. G., Bouchez, A. H. (2006a), A large cloud outburst at Titan's south pole, *Icarus*, **182**(1), doi:10.1016/j.icarus.2005.12.021.
- Schaller, E. L., Brown, M. E., Roe, H. G., Bouchez, A. H., and C. A. Trujillo (2006b), Dissipation of Titan's south polar clouds, *Icarus*, **184**(2), doi:10.1016/j.icarus.2006.05.025.
- Schaller, E. L., Roe, H. G., Schneider, T., and M. E. Brown (2009), Storms in the tropics of Titan, *nature*, **460**, doi:10.1038/nature08193.
- Snowden, D., Yelle, R. V., Cui, J. E., Edberg, N. J. T., and K. Ågren (2013), The thermal structure of Titan's upper atmosphere, I: Temperature profiles from Cassini INMS observations, *Icarus*, **226**(1), doi:10.1016/j.icarus.2013.06.006.
- Tan, S., Sekine, Y., and M. Kuzuhara (2022), Spatially Resolved Observations of Europa's Surface with Subaru/IRCS at 1.0 – 1.8 μ m: Upper Limits to the Abundances of Hydrated Cl-bearing Salts, *The Planetary Science Journal*, **3**(70), doi:10.3847/PSJ/ac596c.
- Trafton, L. (1975), The morphology of Titan's methane bands. I—Comparison with a reflecting layer model, *Astropys. J.*, **195**, 805-814, doi:10.1086/153385.
- Vashist, A. S., Heslar, M. F., Barnes, J. W., Hennen, C., and Ralph D. Lorenz (2023), Titan's North-South Asymmetry Ratio and Boundary at Visible Wavelengths over the Cassini Mission, *The Planetary Science Journal*, **4**(118), doi:10.3847/PSJ/acdd05
- Vinatier, S., Bé zard, B., Lebonnois, S., Teanby, N. A., Achterberg, R. K., Goriús, N., Mamountkine, A., Guandique, E., Jolly, A., Jennings, D. E., and F. Michael Flasar, Seasonal variations in Titan's middle atmosphere during the northern spring derived from Cassini/CIRS observations, *Icarus*, **250**,

95-115, doi:10.1016/j.icarus.2014.11.019.

Waite, J. H., D. T. Young, T. E. Cravens, A. J. Coates, F. J. Crary, B. Magee, and J. Westlake (2007), The process of tholin formation in Titan's upper atmosphere, *Science*, **316**, 870-875, doi:10.1126/science.1139727.

Watanabe, M., Takahashi, Y., Sato, M., Watanabe, S., Fukuhara, T., Hamamoto, K., and Akihito Ozaki (2012), MSI: a visible multi-spectral imager for 1.6-m telescope of Hokkaido University, *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV. Proceedings of the SPIE*, **8446**, doi:10.1117/12.925292.

West, R. A., J. Balloch, P. Dumont, P. Lavvas, R. Lorenz, P. Rannou, T. Ray, and E. P. Turtle (2011), The evolution of Titan's detached haze layer near equinox in 2009, *Geophysical Research Letters*, **38**, L06204, doi:10.1029/2011GL046843.

Westlake, J. H., J. M. Bell, J. H. Waite Jr., R. E. Johnson, J. G. Luhmann, K. E. Mandt, B. A. Magee, and A. M. Rymer (2011), Titan's thermospheric response to various plasma environments, *Journal of Geophysical Research*, **116**, A03318, doi:10.1029/2010JA016251.

Westlake, J. H., Waite, J. H., Bell, J. M., and R. Perryman, (2014), *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **119**(10), A020394, doi:10.1002/2014JA020394.

NASA. "Planetary Fact Sheet". Planetary Fact Sheet. 2024-01-03.
<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/>, (参照 2024-01-30).

Jet Propulsion Laboratory. "Horizons System". Horizons System. <https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/>, (参照 2024-01-30).