

望遠鏡観測による
木星衛星エウロパ表面の NaCl の検出

北海道大学大学院理学院

宇宙理学専攻

惑星宇宙グループ

濱田 築

(指導教員 高木 聖子 講師)

要旨

木星衛星エウロパの表面には、マグネシウムやナトリウムの硫酸塩や炭酸塩などの水和物といった塩類の存在が木星探査機ガリレオの赤外分光観測から推測されている [McCord et al., 2010]。また、地殻褐色化の原因とされてきた塩化ナトリウムの存在もハッブル宇宙望遠鏡(HST)の可視分光観測から明らかになった [Trumbo et al., 2019]。地表面に存在が示唆されるそれらの物質は、氷地殻下に隠された地下海から表出したと思われる地形に集中していることから、①岩石質のマントルと接する海底には岩石と液体水との相互作用が行われる環境が存在し、岩石成分が塩分として液体水に溶出、②それらが凍りながら地下海を上昇、③-1:氷地殻まで到達し表出、または③-2:間欠泉として噴出、という要因が考えられている。しかし、過去の探査機や宇宙望遠鏡による限られた観測時間では、表面に存在する物質の時間変動を追えず、物質の起源や衛星の進化過程について理解は停滞している。

本研究では、北海道大学が所有するピリカ望遠鏡と搭載マルチスペクトル撮像装置(MSI)を用いて、2020年から2022年にかけてエウロパの撮像観測(400-550 nm, 650-800 nm)を実施した。

得られたデータを標準星のカタログフラックスを用いた地球大気補正とエウロパの立体角と標準星の等級を用いた地球大気補正の2つの方法で処理した。また、HSTによる先行研究が示した塩化ナトリウムの吸収波長である450 nmの吸収の強さによって観測した結果を4つの領域に分類した。

結果として、地球大気補正に使用した標準星のスペクトルタイプによって、エウロパのスペクトルの特徴が変化した。また4つの領域を比較した際に大きな違いは見られなかった。その中で、標準星を太陽類似星に設定した場合のデータを用いて、塩化ナトリウムの吸収波長の450 nm、460 nm、720 nmにおける吸収を評価した。それぞれ、統計的に有意だとみられる吸収は確認できなかった。しかし、450 nmの吸収が最も大きかった観測日はNaClが全体に分布している経度であり、最も小さかった観測日はNaClが未検出である経度であった。

今後、地上観測を行う場合は分光器を用いて、エウロパのスペクトルの変動を観測することが必要である。

目次

第1章	はじめに.....	1
1.1	エウロパの概要.....	1
1.2	過去のエウロパ観測.....	2
1.3	エウロパの放射線環境とカラーセンターの形成.....	4
1.4	研究目的.....	8
第2章	観測.....	9
2.1	ピリカ望遠鏡.....	9
2.2	MSI.....	10
2.3	観測概要.....	11
第3章	解析.....	14
3.1	一次処理.....	14
3.2	開口測光.....	14
3.3	標準星のカタログフラックスを用いた地球大気補正.....	15
3.4	エウロパの立体角と標準星の等級を用いた地球大気補正.....	15
3.5	観測結果の NaCl 堆積分布による経度分類.....	16
第4章	結果.....	18
4.1	標準星のカタログフラックスを用いて地球大気補正を行った解析結果.....	18
4.1.1	波長 400 nm から 550 nm の解析結果.....	18
4.1.2	波長 650 nm から 800 nm の解析結果.....	21
4.2	エウロパの立体角と標準星の等級を用いて地球大気補正を行った解析結果.....	24
4.2.1	波長 400 nm から 550 nm の解析結果.....	24
4.2.2	波長 650 nm から 800 nm の解析結果.....	27
第5章	考察.....	31
5.1	標準星のスペクトルタイプによる解析結果の違い.....	31
5.2	波長 450 nm と 460 nm、720 nm における吸収の有無.....	33

第6章 まとめ.....	37
謝辞.....	38
参考文献.....	39

第1章 はじめに

1.1 エウロパの概要

木星の衛星のうち、惑星に匹敵するほど大きい4つの衛星をガリレオ衛星(木星から近い順にイオ、エウロパ、ガニメデ、カリスト)と呼ぶ。エウロパの半径は約1,561 kmであり、平均密度は 3 gcm^{-3} である。地表面(氷地殻)の地形(図1.1、1.2)は地殻の破壊と水の噴出が繰り返されていることを示唆している。さらに木星探査機ガリレオ(1989年 NASA 打ち上げ)の観測により、塩類の溶け込んだ水からなる高電気伝導度層を示唆する磁場の異常が観測され、氷地殻下には内部海が存在すると推測されている。液体の水は地球型生命にとって必須の物質であり、エウロパは将来の地球外生命探査の有力な対象に位置づけられている。

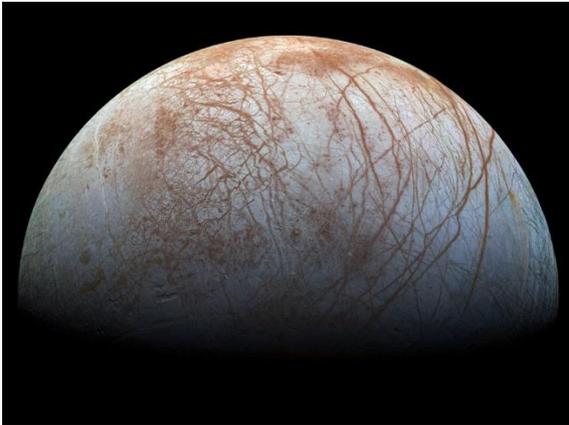


図 1.1 エウロパ表面の割れ目地形 [NASA]

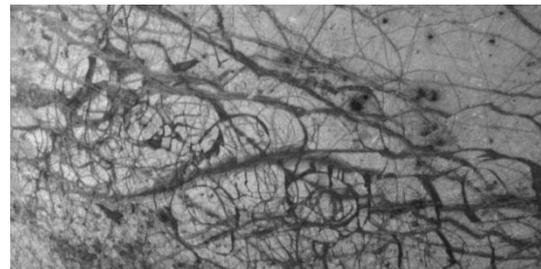


図 1.2 エウロパ表面の浮氷地形 [NASA]

1.2 過去のエウロパ観測

ハッブル宇宙望遠鏡 (HST、1990 年 NASA 打ち上げ) に搭載された宇宙望遠鏡撮像分光器 Space Telescope Imaging Spectrograph (STIS) により、エウロパ表面から噴出する水蒸気を含む間欠泉の存在が示唆された(図 1.3)。この間欠泉は宇宙空間まで達し、一部は地表に堆積すると推測されている。

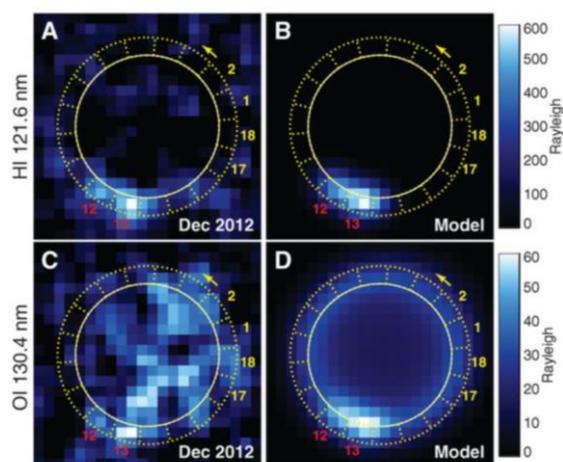


図 1.3 2012 年 12 月に STIS により観測された南半球に広がる水素ライマン- α 121.6 nm と酸素 OI 130.4 nm の画像[Roth et al., 2014]

探査機ガリレオに搭載された近赤外線分光器 Near-infrared Mapping Spectrometer (NIMS) により、 $0.7 \mu\text{m}$ から $5.2 \mu\text{m}$ におけるエウロパ表面のスペクトルが観測された(図 1.4)。その観測から、エウロパ表面にはマグネシウムやナトリウムの硫酸塩や炭酸塩などの水和物といった塩類の存在が示唆された。しかし、NIMS の低い分解能では氷ではない物質の組成は未解明である。

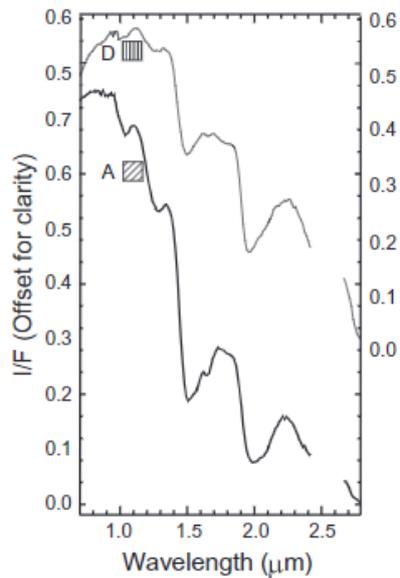


図 1.4 探査機ガリレオに搭載された NIMS によって観測されたエウロパのアルベド
[McCord et al., 2010]

その後、Keck II 望遠鏡に搭載されている近赤外分光計 Near Infrared Spectrometer (NIRSPEC) を用いて、 $3.1 \mu\text{m}$ から $4.13 \mu\text{m}$ のスペクトルが観測された(図 1.5)。その観測から $3.78 \mu\text{m}$ の吸収が確認された(図 1.6)。この吸収は硫酸塩の特徴と一致するが、硫酸塩の他の吸収波長である $3.56 \mu\text{m}$ と $4.07 \mu\text{m}$ では、吸収が確認されなかった。そのため、これらの特徴に当てはまる炭酸塩、ブロダイト ($\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)、硬石膏 (CaSO_4) がエウロパ表面を構成する物質の候補となると示唆された。

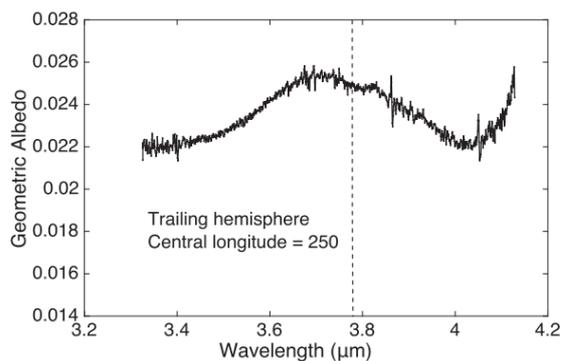


図 1.5 trailing 半球の平均スペクトル
[Trumbo et al., 2017]

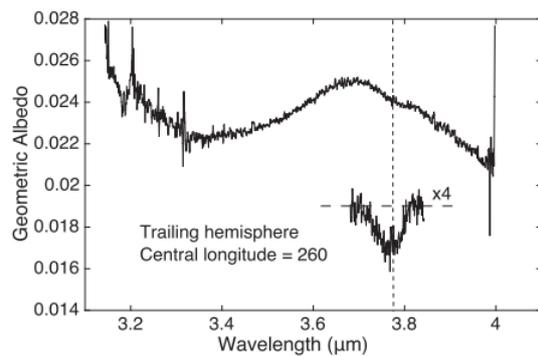


図 1.6 平均半球分解スペクトル
[Trumbo et al., 2017]

1.3 エウロパの放射線環境とカラーセンターの形成

木星の磁気モーメントは地球の約 20,000 倍の強さであり、太陽系で最も強い磁場を持つ。この強い磁場内に木星磁気圏外に存在する高温電子が移動するとある種の電磁波を励起し、さらに電子を加速させることで高エネルギーの電子が大量に存在する放射線帯と呼ばれる帯状の構造を形成する。この放射線帯の強さは探査機や地上観測の結果からモデリングされてきた。GIRE2 は木星探査機ガリレオに搭載されたエネルギー粒子検出器 Energetic Particles Detector (EPD)の観測データを用いた木星放射線帯のモデルである (図 1.7)。図 1.7 が示すように、エウロパの公転軌道半径は 9 木星半径(R_J)なので、数 MeV の高エネルギーの放射線が降り注ぐ環境であることが分かる。

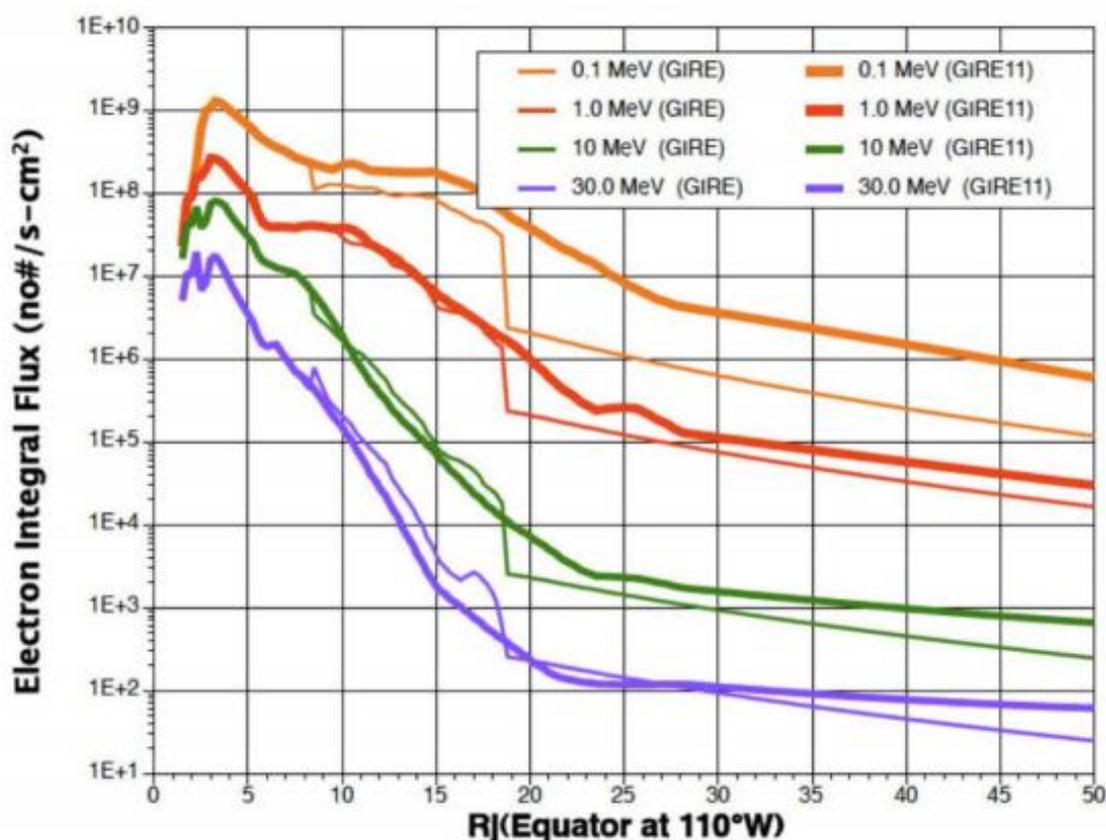


図 1.7 GIRE2 による木星の放射線帯のモデル[Garrett et al., 2012]

このような強い放射線環境の中で塩化物や硫酸塩、炭酸塩は格子内の陰イオンが欠落し、電子が入り込むことによって、特定の波長の光を吸収し、カラーセンターを形成する(図 1.8)。カラーセンターは特定の波長の光を吸収するため、物質はその光の補色になる。

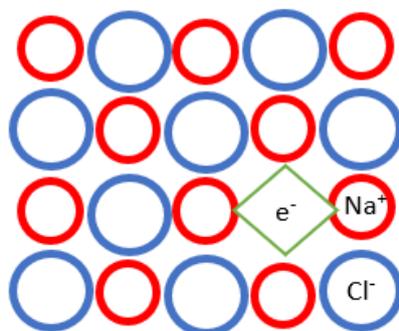


図 1.8 NaCl のカラーセンターの模式図

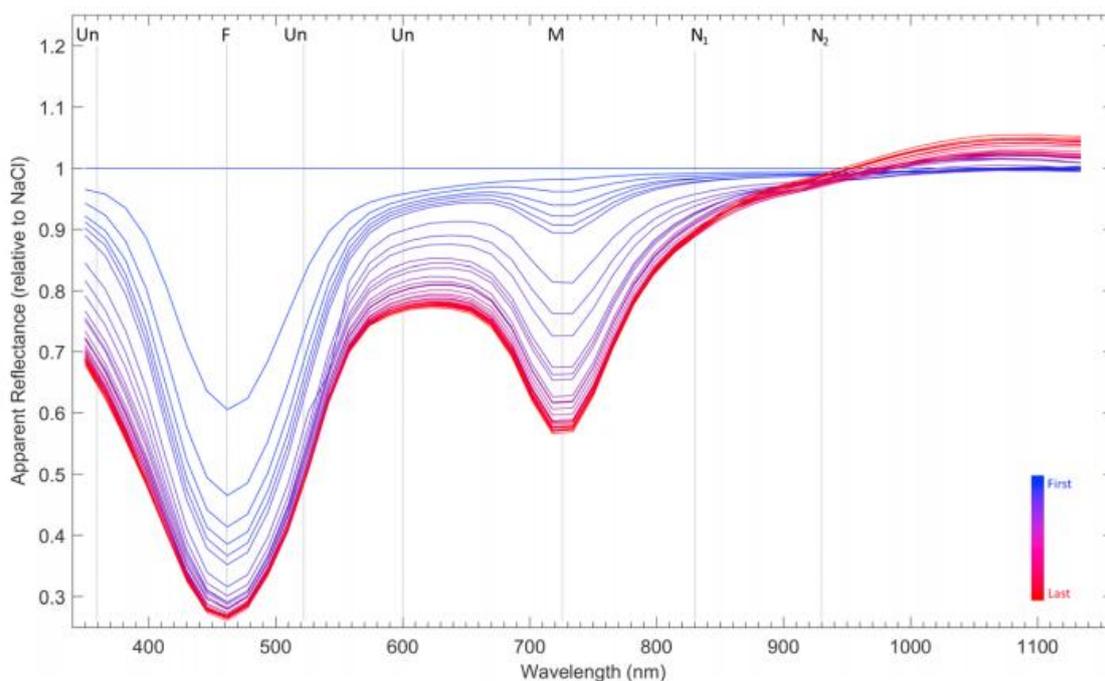


図 1.9 NaCl への電子線照射実験のスペクトル [Poston et al., 2017]

縦軸は反射率であり、電子線を照射していない NaCl の反射率を 1 としている。横軸は波長である。グラフの色が青から赤になるにつれ、照射時間が長いことを表している。最初の 6 つのスペクトルは 15 分間隔であり、それ以降は 2.5 時間ごとに計測したものである。実験の結果、460 nm の波長の光を吸収する F センターと 720 nm の波長の光を吸収する M センターが形成されることが分かった。



図 1.10 電子線照射後の NaCl
[Hand et al., 2015]

特にエウロパ表面環境下で NaCl に放射線を照射すると、F センター(吸収波長 460 nm)と M センター(吸収波長 720 nm)の 2 つのカラーセンターが形成され(図 1.9)、黄色みを帯びた色に変わることが発見された(図 1.10)。この色がエウロパ表面の Tara 地域の色に似ていることから、HST による NaCl の吸収波長である可視光観測が行われることとなった。

図 1.11 は HST によるエウロパ表面のスペクトルである。図 1.11(左図)に示すように波長 450 nm 付近には凹みが存在し、これはエウロパ表面に存在する NaCl による吸収と推測されている。一方、波長 720 nm の NaCl による吸収は確認されなかった(図 1.11 右図)。

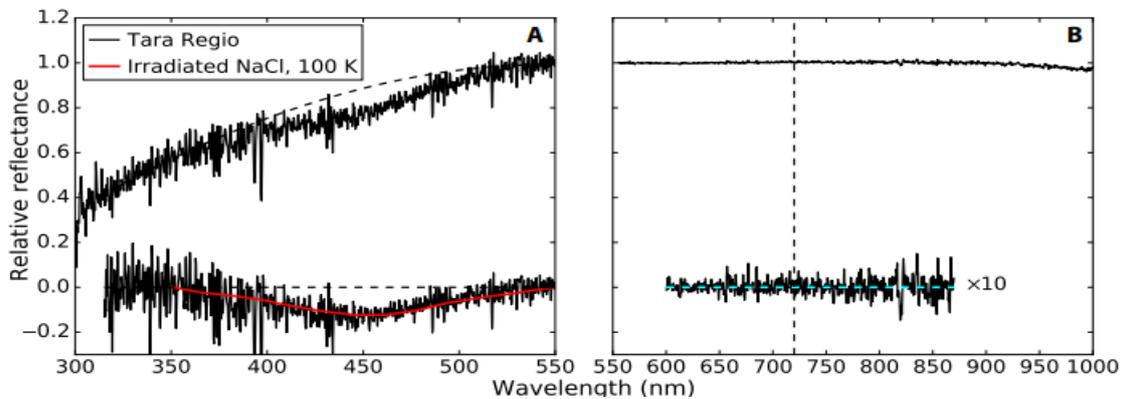


図 1.11 HST の観測により得られたエウロパ表面のスペクトル
[Trumbo et al., 2019]

縦軸は相対反射率であり、横軸は波長である。上側の実線が観測データであり、下側の実線が上側の点線でフィッティングしたものである。左図の赤い実線は Poston et al.(2017)の室内実験の結果である。右図の縦の点線は室内実験で生成された M センターの吸収波長である 720 nm を示している。

また、図 1.12 はエウロパ全球における波長 450 nm の吸収透過幅である。図 1.12 によると波長 450 nm の光を最も吸収するのは Tara 地域と呼ばれる地質的に活発なカオス地域の 1 つであった。また、2 番目に吸収を示した場所もカオス地域の 1 つである Powys 地域であった。このように NaCl はカオス地域が多い leading 半球と呼ばれるエウロパの公転方向に向いている半球に集中して存在していることが明らかになった。

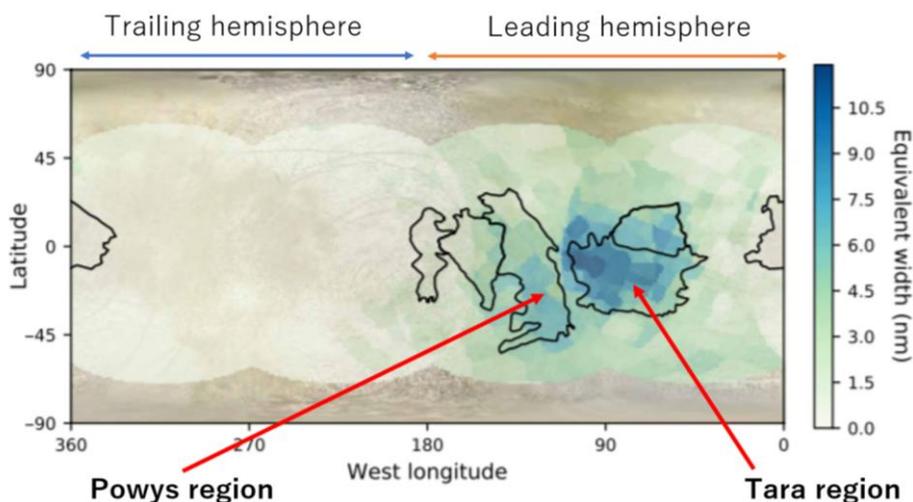


図 1.12 エウロパ全球における波長 450nm の吸収透過幅[Trumbo et al., 2019]

縦軸は緯度であり、横軸は経度である。経度において、0° は木星直下点である。

ここで、波長 450 nm に吸収があることを検証するために再度実験が行われた[Denman et al., 2022]。温度を正確に調整したとき、F センターは 451 nm に吸収が見られ、温度が上昇した場合、460 nm に吸収が形成されることが分かった(図 1.13)。

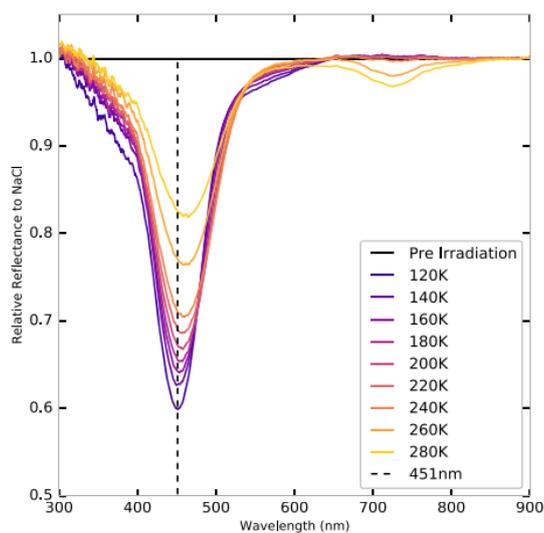


図 1.13 120 K で NaCl に照射した後に加温した場合のスペクトルの変化 [Denman et al., 2022]

1.4 研究目的

従来は、探査機や宇宙望遠鏡による時間が限られた観測が行われてきた。しかし、衛星の進化過程を解明するためには、衛星に存在する物質の時間変動を追うことが不可欠であり、連続的に長期間観測し続けることが重要である。

本研究では、北大が所有するピリカ望遠鏡を専有的に用いて、エウロパの長期連続観測を実現し、NaClの吸収の有無と時間変動を調査する。それにより、NaClの起源や衛星の進化過程を推定する。

第 2 章 観測

2.1 ピリカ望遠鏡

ピリカ望遠鏡は北海道大学が名寄市の北海道大学大学院理学研究院附属天文台に設置した主鏡有効径 1.6 m の光学望遠鏡である。大学が国内に所有する望遠鏡としては 3 番目の大きさである。大学の望遠鏡が持つ豊富な観測時間を活かして、エウロパの長期連続的な観測が可能である。表 2.1 はピリカ望遠鏡の光学系に関する仕様である。

表 2.1 ピリカ望遠鏡の光学系仕様

	仕様
光学系	リッチークレチアン
焦点	カセグレン、ナスミス×2
主鏡有効径	1,600 mm
合成焦点距離	19,238 mm
合成 F 値	12.0
視野	直径 20 分角(カセグレン) 直径 10 分角(ナスミス A) 直径 3 分角(ナスミス B)



図 2.1 ピリカ望遠鏡外観

2.2 MSI(Multi-Spectrum Imager)

MSI はペリカ望遠鏡用に開発した可視光の天体撮像観測装置である。MSI は 2 種類の液晶波長可変フィルター(LCTF)と 512×512 ピクセルの電子増倍型 CCD カメラを備えることで、波長 400 nm から 1100 nm に渡るマルチスペクトル画像を取得できる観測装置である。視野は 3.3 分角×3.3 分角(0.389 秒角/pixel)である。LCTF は波長域が 400 nm から 720 nm の VIS フィルターと、波長域が 650 nm から 1100 nm の SNIR フィルターの 2 台が搭載されている。二つのフィルターの特性を図 2.3 に示す。



図 2.2 MSI の外観

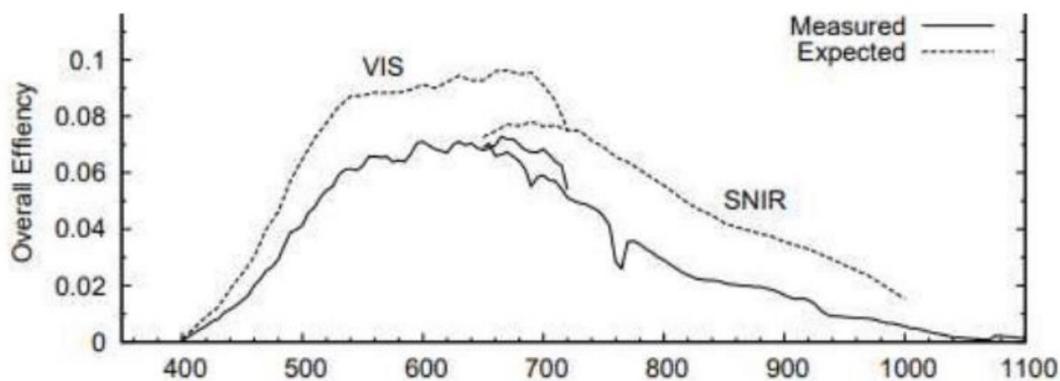


図 2.3 MSI に搭載されている LCTF 特性 [Watanabe et al., 2012]

2.3 観測概要

1.3で前述したように、エウロパ表面のNaClによる吸収(450 nm, 720 nm)を捉えるため、400 nm から 550 nm と 650 nm と 800 nm の 2 波長域において 10 nm 刻みにエウロパと標準星(表 2.3)の撮像観測を実施した。その観測実績を表 2.2 に示す。

表 2.2 観測実績

観測日	時間(JST)	観測天体	エアマス	露光時間 [s]	天気
2020/8/17	20:58 - 21:23	エウロパ	2.537 - 2.552	5	晴れ
2020/8/17	21:34 - 21:39	HR8260	2.697 - 2.627	5	晴れ
2020/8/20	20:08 - 20:44	エウロパ	2.620 - 2.541	7	晴れ
2020/8/20	21:05	HR8260	2.897 - 2.857	7	晴れ
2020/9/28	18:34	エウロパ	2.561 - 2.585	7	晴れ
2020/9/28	18:50	HR8698	2.688 - 2.594	5	晴れ
2020/10/20	17:56	エウロパ	2.663 - 2.760	10	晴れ
2020/10/20	18:15	HR8698	2.354 - 2.316	5	晴れ
2021/7/3	24:47 - 24:55	エウロパ	2.236 - 2.150	10	晴れ
2021/7/3	25:25 - 25:34	HR8698	1.969 - 1.914	3	晴れ
2021/7/15	24:02 - 24:10	エウロパ	2.219 - 2.159	3	晴れ
2021/7/15	24:29 - 24:36	HR8698	2.029 - 1.982	3	晴れ
2021/7/26	23:56 - 24:09	エウロパ	1.977 - 1.946	8	晴れ
2021/7/26	24:27 - 24:34	HR8698	1.798 - 1.773	2	晴れ
2021/7/28	23:36 - 23:45	エウロパ	2.059 - 1.991	5	晴れ
2021/7/28	23:57 - 24:09	HR8698	1.908 - 1.846	1	晴れ
2021/8/5	24:23 - 24:35	エウロパ	1.849 - 1.844	5	晴れ
2021/8/5	24:44 - 24:50	HR8698	1.646 - 1.638	2	晴れ
2021/8/12	24:59 - 25:15	エウロパ	1.925 - 1.971	3	晴れ
2021/8/12	25:29 - 25:39	HR8698	1.632 - 1.645	1	晴れ
2021/8/19	22:45 - 22:57	エウロパ	1.940 - 1.913	3	晴れ
2021/8/19	23:05 - 23:11	HR8698	1.755 - 1.732	1	晴れ
2021/8/21	22:58 - 23:23	エウロパ	1.900 - 1.820	3	晴れ
2021/8/21	23:17 - 23:35	HR8698	1.694 - 1.656	5	晴れ
2021/8/30	21:46 - 22:03	エウロパ	2.000 - 1.952	2	晴れ

2021/8/30	21:55 - 22:09	HR8698	1.868 - 1.789	0.5	晴れ
2021/9/24	20:26 - 20:47	エウロパ	1.978 - 1.955	8	晴れ
2021/9/24	20:57 - 21:04	HR8232	1.549 - 1.552	1	晴れ
2021/9/27	23:07 - 23:16	HR8232	2.008 - 2.087	1	晴れ
2021/9/27	23:25 - 23:41	エウロパ	2.831 - 3.122	8	晴れ
2021/10/13	19:17 - 19:27	エウロパ	1.979 - 1.970	5	晴れ
2021/10/13	19:54 - 20:05	HR8232	1.555 - 1.564	0.5	晴れ
2021/11/6	21:08 - 21:23	エウロパ	3.205 - 3.586	5	晴れ
2021/11/6	21:34 - 21:42	HR8232	2.817 - 2.985	1	晴れ
2021/12/8	19:16 - 19:52	エウロパ	3.042 - 4.051	8	晴れ
2021/12/8	20:07 - 20:18	HR8232	3.936 - 4.467	1	晴れ
2022/8/21	25:01 - 25:17	エウロパ	1.406 - 1.383	5	晴れ
2022/8/21	25:28 - 25:47	HR0248	1.466 - 1.441	5	晴れ
2022/9/2	22:07 - 22:14	HR8414	1.427 - 1.416	0.5	晴れ
2022/9/2	24:48 - 24:18	HR0248	1.510 - 1.454	5	晴れ
2022/9/2	23:11 - 23:31	エウロパ	1.572 - 1.502	8	晴れ
2022/9/7	24:17 - 25:10	HR0248	1.473 - 1.423	1	晴れ
2022/9/7	25:15 - 25:37	エウロパ	1.385 - 1.407	2	晴れ
2022/9/13	24:21 - 24:32	エウロパ	1.381 - 1.382	5	曇り
2022/9/13	24:42 - 24:57	HR0248	1.424 - 1.422	8	曇り
2022/9/14	23:24 - 24:34	エウロパ	1.420 - 1.401	5	晴れ
2022/9/14	23:08 - 23:15	HR8414	1.461 - 1.482	0.488	晴れ
2022/9/14	24:11 - 24:31	HR0248	1.442 - 1.427	3	晴れ
2022/9/21	24:42 - 24:59	エウロパ	1.434 - 1.482	8	晴れ
2022/9/21	25:33 - 25:42	HR0248	1.496 - 1.515	1	晴れ
2022/9/25	21:59 - 22:14	HR8414	1.424 - 1.452	2	曇り
2022/9/25	22:54 - 23:09	エウロパ	1.413 - 1.398	10	曇り
2022/9/25	23:34 - 24:17	HR0248	1.436 - 1.425	2	曇り
2022/9/27	22:40 - 22:48	HR8414	1.513 - 1.551	1	晴れ
2022/9/27	22:59 - 23:11	エウロパ	1.405 - 1.389	5	晴れ
2022/9/27	23:25 - 23:36	HR0248	1.437 - 1.424	2	晴れ
2022/9/28	23:05 - 23:13	HR8414	1.608 - 1.661	0.5	曇り

2022/9/28	24:09 – 24:29	エウロパ	1.440 – 1.490	5	曇り
2022/9/28	24:38 – 24:48	HR0248	1.449 – 1.472	2	曇り
2022/10/13	20:41 – 21:06	HR8414	1.416 – 1.454	1	晴れ
2022/10/13	21:21 – 21:30	エウロパ	1.451 – 1.431	5	晴れ
2022/10/13	22:07 – 21:52	HR0248	1.479 – 1.444	3	晴れ
2022/10/20	21:45 – 21:51	HR8414	1.615 – 1.678	0.488	晴れ
2022/10/20	22:02 – 22:20	エウロパ	1.434 – 1.458	3	晴れ
2022/10/20	22:29 – 22:47	HR0248	1.422 – 1.427	3	晴れ
2022/10/25	20:54 – 21:15	HR8414	1.525 – 1.612	1	晴れ
2022/10/25	21:26 – 21:48	エウロパ	1.431 – 1.448	5	晴れ
2022/10/25	21:59 – 22:19	HR0248	1.423 – 1.424	3	晴れ
2022/10/31	19:20 – 19:27	HR8414	1.408 – 1.417	0.488	晴れ
2022/10/31	20:37 – 21:08	エウロパ	1.439 – 1.443	5	晴れ
2022/10/31	21:20 – 21:40	HR0248	1.430 – 1.422	1	晴れ
2022/11/8	19:45 – 20:21	エウロパ	1.445 – 1.439	3	曇り
2022/11/8	19:56 – 20:08	HR8414	1.516 – 1.565	1	曇り
2022/11/10	19:27 – 19:48	HR8414	1.467 – 1.524	5	晴れ
2022/11/10	19:55 – 20:19	エウロパ	1.444 – 1.442	8	晴れ
2022/11/10	20:30 – 20:54	HR0248	1.439 – 1.422	5	晴れ

表 2.3 観測した標準星

標準星名	分類	スペクトル型	エウロパとのエア マス差	時期
HR8260	Star	B3V	0.15 – 0.3	2020/8/27 – 2020/10/20
HR8698	Long-period Variable	M2.5III	0.1 – 0.3	2021/7/3 – 2021/8/30
HR8232	Star	G0Ib	0.4 – 1.0	2021/9/24 – 2021/12/8
HR0248	Star	K5III	0.1 以下	2022/8/21 – 2022/11/10
HR8414	Star	G2Ib	0.1 – 0.2	2022/9/2 – 2022/11/10

第 3 章 解析

3.1 一次処理

解析で撮像画像に対して最初に行った一次処理を記述する。エウロパと標準星の画像以外にバイアス画像と、別日にフラット画像を取得した。バイアス画像は MSI の CCD カメラの出力値が負の値を示さないように予め設定されているカウント値を画像として取得したものである。連続で 10 枚撮像したものを平均した画像を用いた。フラット画像は CCD の 1 ピクセルごとの感度のムラを補正するための画像であり、ドーム内のスクリーンを一樣な明るさで照らし、それを観測することで取得した。これらの画像を用いて、以下の式のように処理した。

$$\text{天体処理画像} = (\text{天体画像} - \text{バイアス画像}) / (\text{フラット画像} - \text{バイアス画像}) \quad \dots(1)$$

3.2 開口測光

開口測光とは星自体の明るさを測定する方法の一つである。本研究では、すばる画像処理ソフト Makali'i を用いた。開口測光は以下の手順で行われる。

測光する天体の中心を、一定の半径の仮想円(開口：図 3.1 左の赤い円)の中心として設置し、開口内の天体からの光量を積分する。さらにその開口外の近傍かつ明らかな天体がない場所に開口(図 3.1 左の 2 つの青い円の間)を設置し、背景光量を積分する。この背景光量を天体のピクセル分に変換し、差し引くことで、天体自体の光量を決定する。

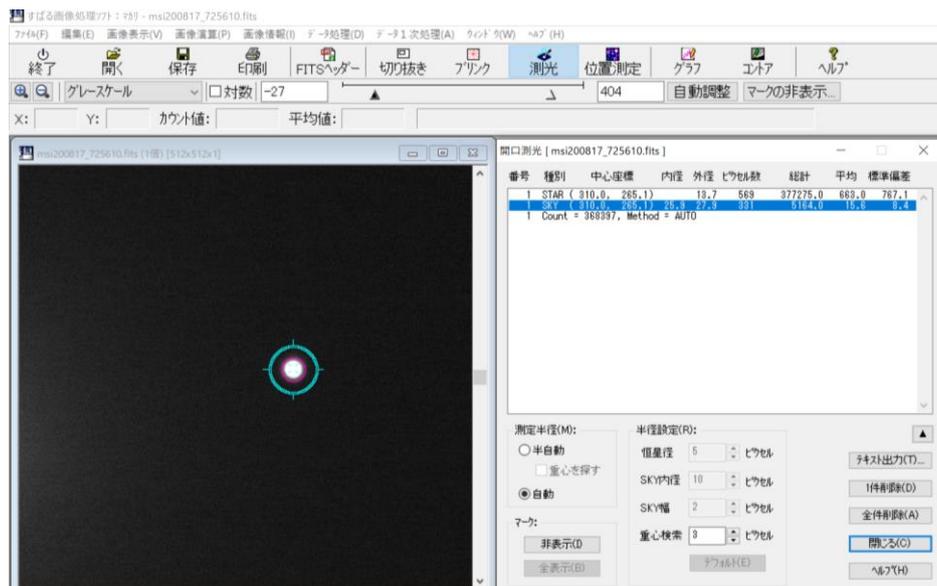


図 3.1 すばる画像処理ソフト Makali'i を用いた開口測光の例

3.3 標準星のカタログフラックスを用いた地球大気補正

標準星とは光学的な性質が安定しており、なおかつ明るさやスペクトルの性質が観測によって詳細に調べられている恒星のことを指す。標準星の光学的特徴はカタログとして VizieR(<https://vizier.cds.unistra.fr/viz-bin/VizieR>)に掲載されているものを使用した。地球大気補正は大気による吸収や散乱を補正するために行われる。

地球大気補正は以下の式のように処理した。

エウロパフラックス(mW/m²/cm)

$$= \frac{\text{標準星のカタログフラックス [mW/m}^2\text{/cm]}}{\frac{\text{観測した標準星のカウント値}}{\text{開口時間 [s]}}} \times \frac{\text{観測したエウロパのカウント値}}{\text{開口時間 [s]}} \dots(2)$$

さらに太陽定数から入射フラックスを求め、反射率に変換した。

$$\text{エウロパ反射率} = \frac{\text{エウロパフラックス}}{\text{入射フラックス}} \dots(3)$$

3.4 エウロパの立体角と標準星の等級を用いた地球大気補正

3.2とは異なる方法としてエウロパの立体角と標準星の等級を用いて以下の式[Tan et al., 2022]のように地球大気補正を行った。ここで $R(\lambda)$ は反射スペクトル、 Ω_{area} はエウロパの立体角(1.94×10^{-11} sr)、 $M_{\text{standard star}}$ は標準星の見かけの等級、 $M_{\text{sun at Europa}}$ はエウロパから見た太陽の等級(-23.16 等)を表している。

$$R(\lambda) = \frac{\text{Europa spectra}(\lambda)}{\text{standar star spectra}(\lambda)} \times \frac{\text{standard star exposure time}}{\text{Europa exposure time}} \times \frac{1}{\Omega_{\text{area}} \times 10^{\frac{2}{5}(M_{\text{standar star}} - M_{\text{sun at Europa}})}} \dots(4)$$

3.5 観測結果の NaCl 堆積分布による経度分類

図 1.12 で示した通り、エウロパ表面の NaCl は領域によって堆積量が異なると考えられる。そのため、解析した結果を 450 nm の吸収分布の強度から観測面全体に NaCl が存在する領域、観測面の半分以上に NaCl が存在する領域、観測面の半分より少なく NaCl が存在する領域、観測面で NaCl が未検出の領域の 4 つに分類した。図 3.3 は各観測日における木星に対するエウロパの位置を表した模式図である。それぞれの位置のエウロパの色は図 3.2 に対応している。

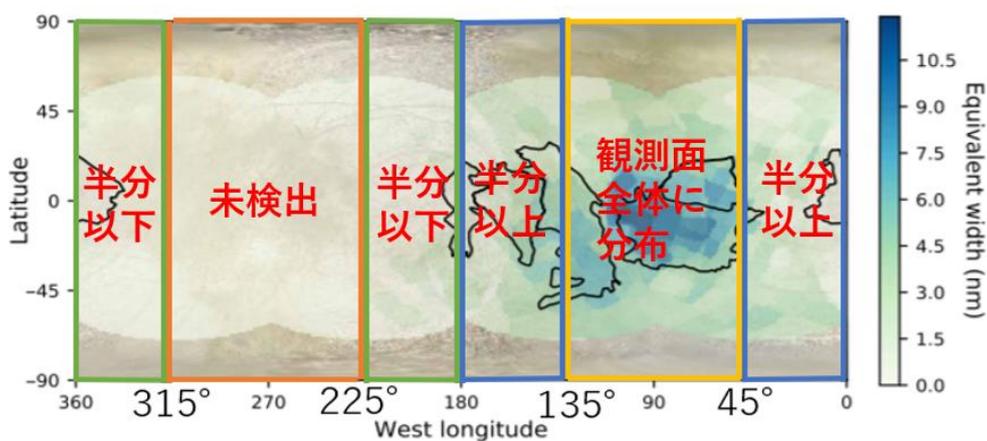


図 3.2 エウロパ表面の 450 nm 吸収の強度による分類

表 3.1 エウロパ表面の NaCl 存在量と経度

NaCl存在量	経度
観測面全体	45° ~135°
観測面の半分以上に堆積	0° ~45° , 135° ~180°
観測面の半分より少なく堆積	315° ~0° , 180° ~225°
観測面では未検出	225° ~315°

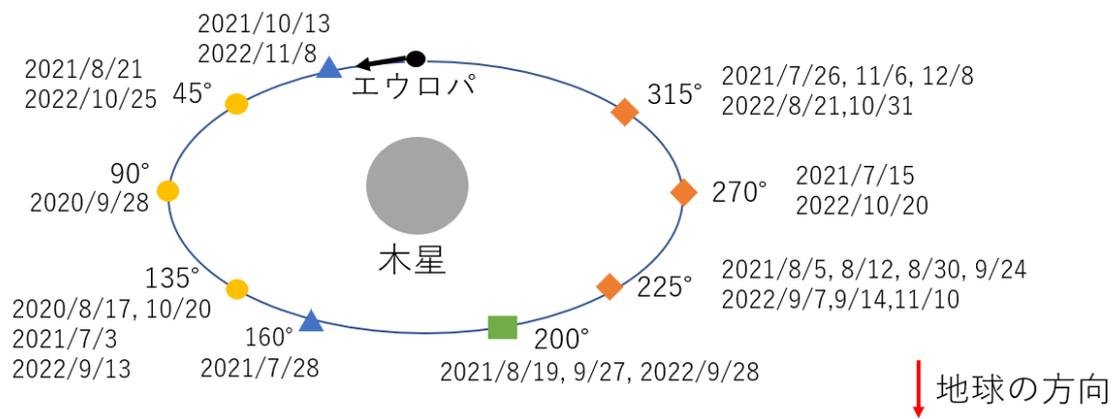


図 3.3 各観測日の木星に対する位置関係を表した模式図

第4章 結果

4.1 標準星のカatalogフラックスを用いて地球大気補正を行った解析結果

4.1.1 波長 400 nm から 550 nm の解析結果

3.3 で述べた方法で解析した波長 400 nm から 550 nm の解析結果を以下に示す。グラフは 3.5 で示した領域ごとに形成している。また、標準星が太陽類似星の場合はプロットをひし形に変更している。

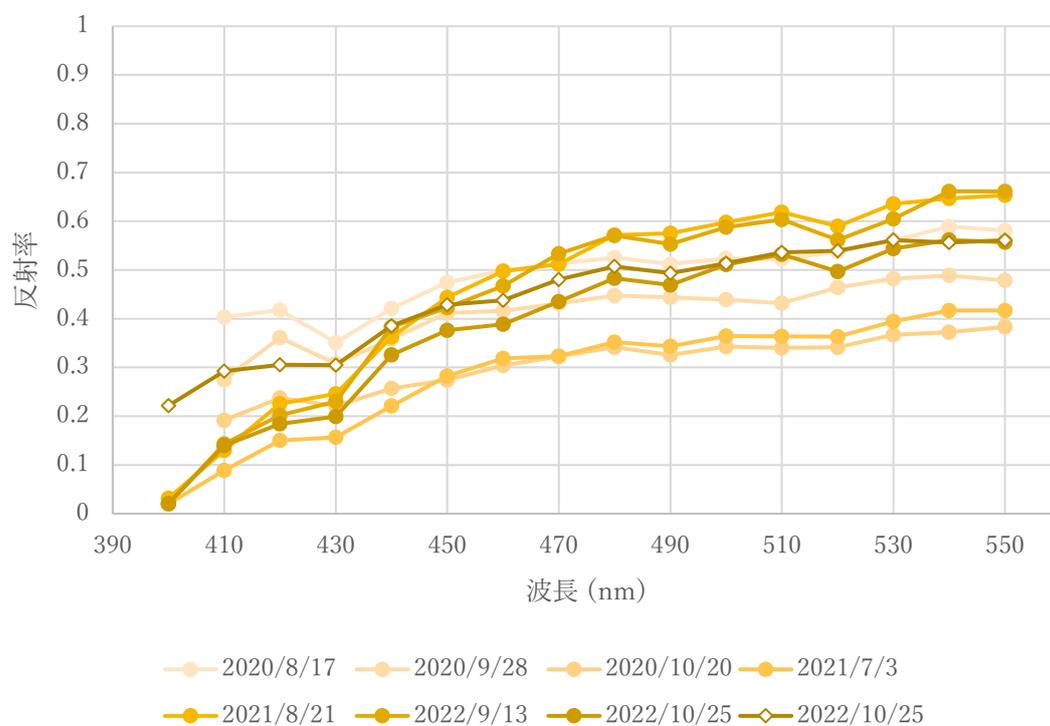


図 4.1 観測面全体に NaCl が存在する領域(経度 45° ~ 135°)の反射率

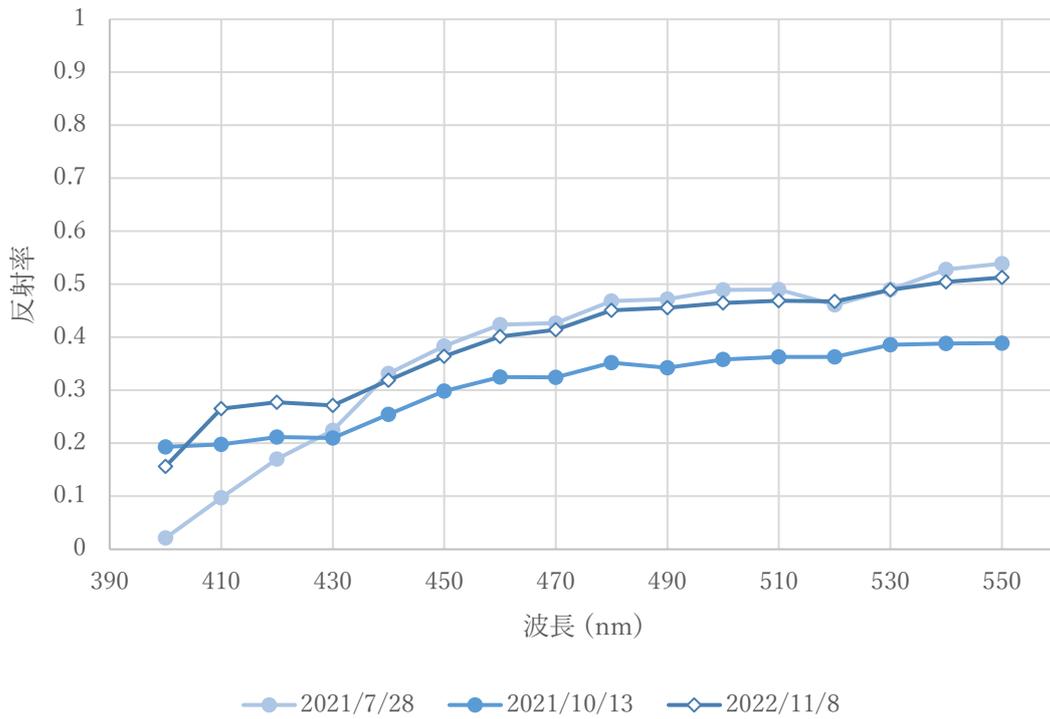


図 4.2 観測面の半分以上に NaCl が存在する領域(経度 $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$, $135^{\circ} \sim 180^{\circ}$)の反射率

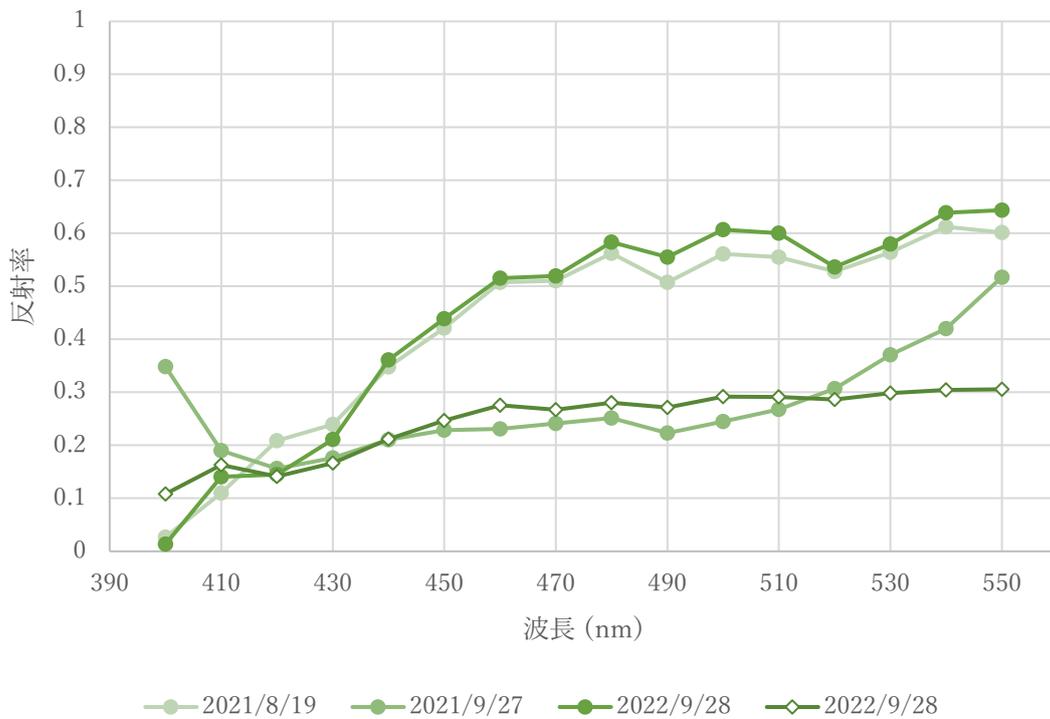


図 4.3 観測面の半分より少なく NaCl が存在する領域(経度 $315^{\circ} \sim 0^{\circ}$, $180^{\circ} \sim 225^{\circ}$)の反射率

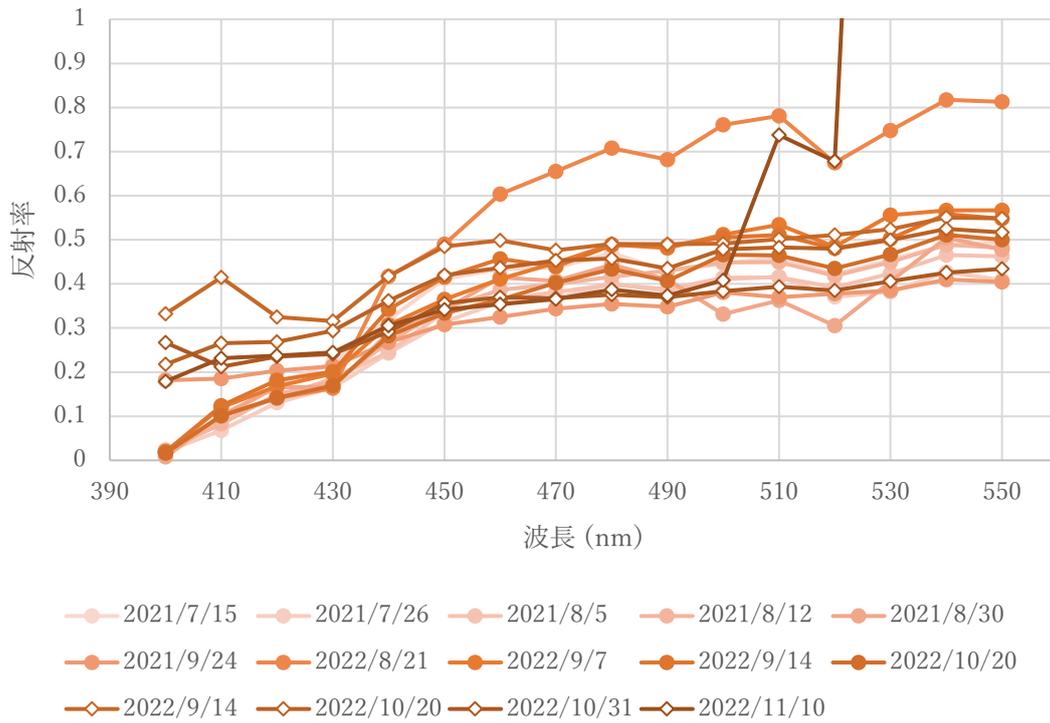


図 4.4 観測面に NaCl が未検出の領域(経度 225° ~315°)の反射率

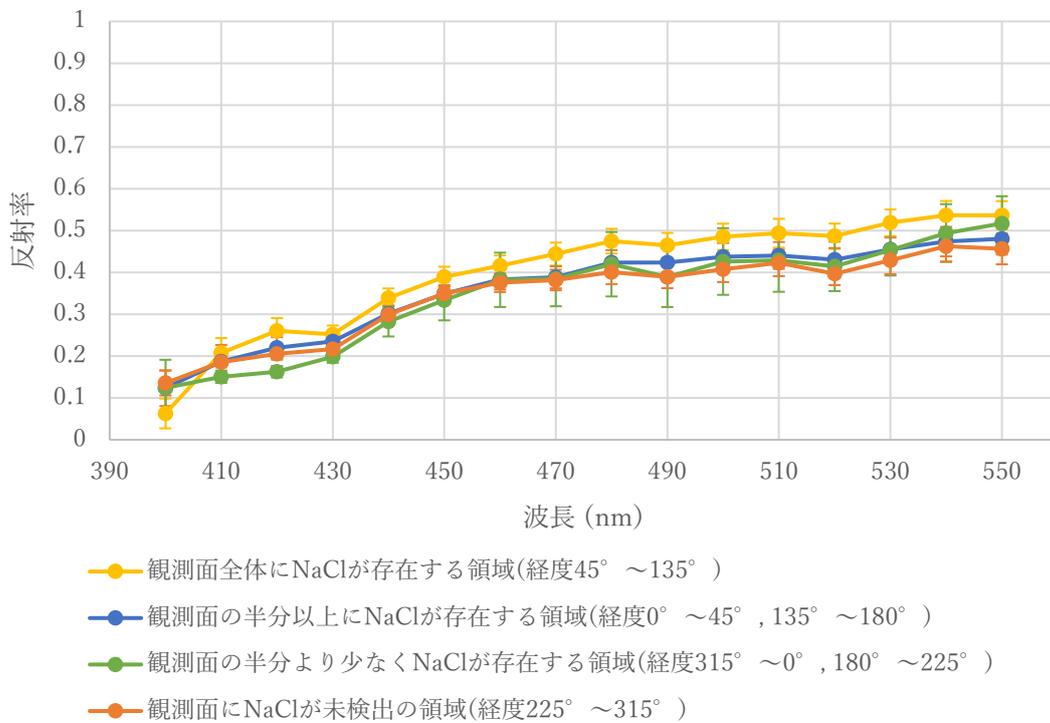


図 4.5 経度ごとの平均反射率

平均スペクトルではどの経度においても差異は少ない。全ての経度において短波長で反射率が小さく、長波長になるにつれて反射率が大きくなるスペクトルとなっている。また、全ての経度で 430 nm と 490 nm、520 nm の凹みが見られた。標準星を太陽類似星に設定した場合は 520 nm の凹みが小さく、傾きも他のスペクトルに比べて小さかった。

4.1.2 波長 650 nm から 800 nm の解析結果

3.3 で述べた方法で解析した波長 650 nm から 800 nm の観測結果を以下に示す。また、標準星が太陽類似星の場合はプロットをひし形に変更している。

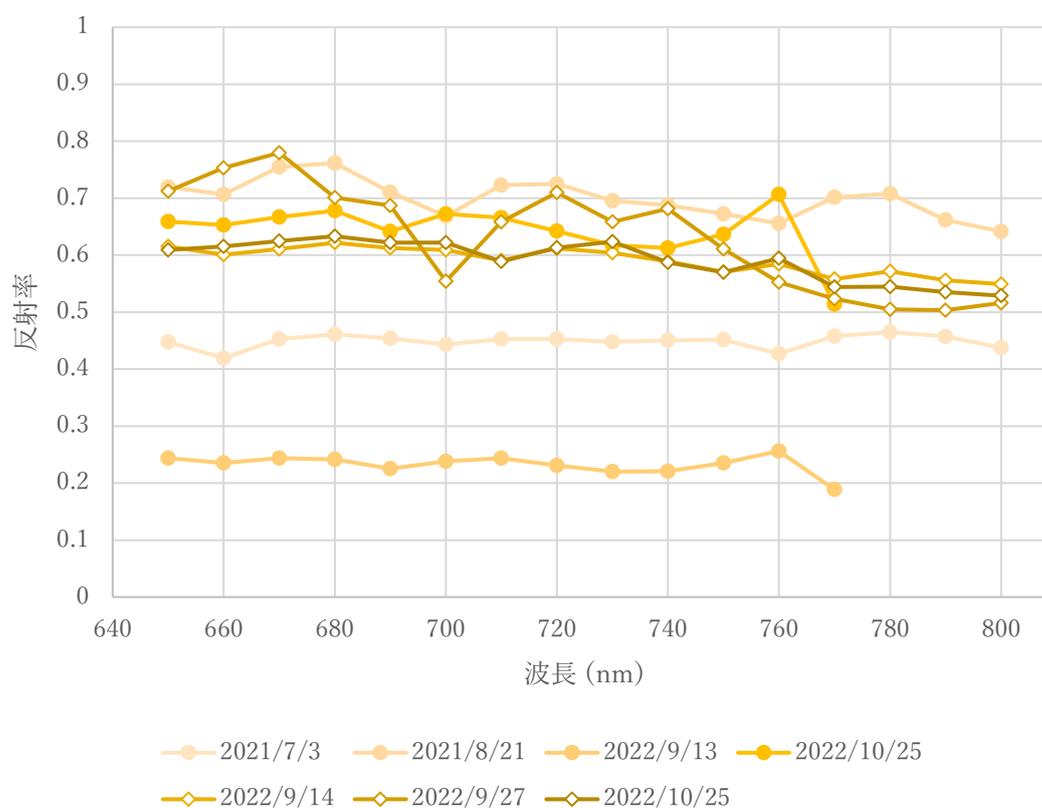


図 4.6 観測面全体に NaCl が存在する領域(経度 45° ~135°)の反射率

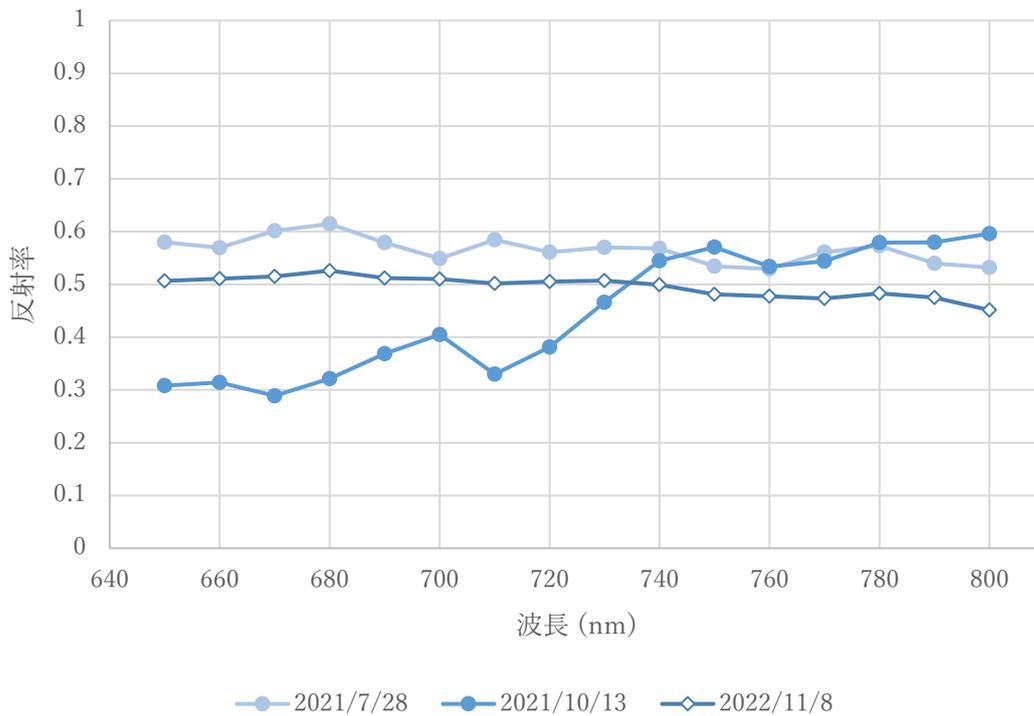


図 4.7 観測面の半分以上に NaCl が存在する領域(経度 $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$, $135^{\circ} \sim 180^{\circ}$)の反射率

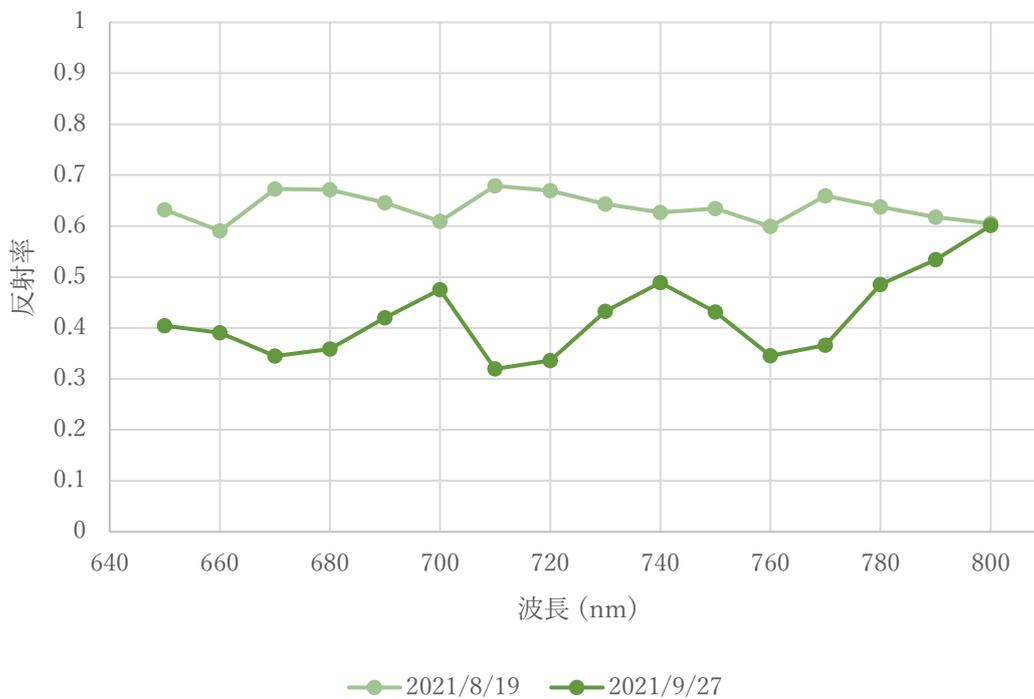


図 4.8 観測面の半分より少なく NaCl が存在する領域(経度 $315^{\circ} \sim 0^{\circ}$, $180^{\circ} \sim 225^{\circ}$)の反射率

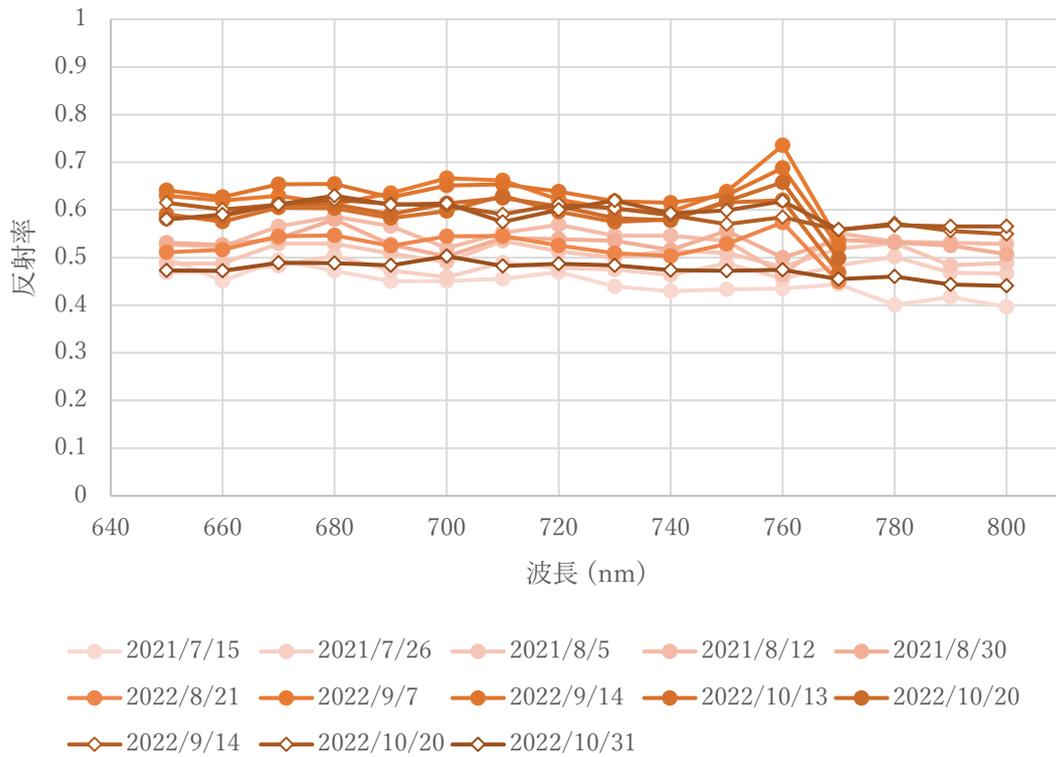


図 4.9 観測面に NaCl が未検出の領域(経度 225° ~315°)の反射率

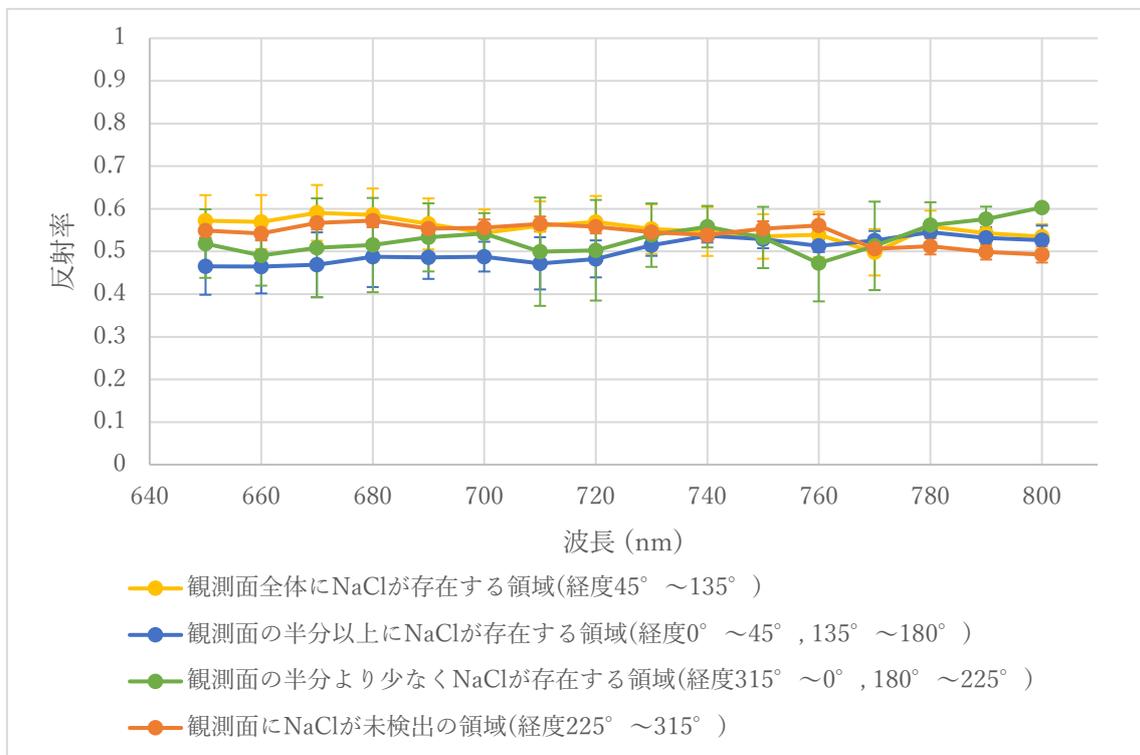


図 4.10 経度ごとの平均反射率

平均スペクトルではどの経度においても差異は少ない。グラフの傾きは短波長側と比較して小さい。また、波長 760 nm において凹みが見られる。

4.2 エウロパの立体角と標準星の等級を用いて地球大気補正を行った解析結果

4.2.1 波長 400 nm から 550 nm の解析結果

3.4 で述べた方法で解析した波長 400 nm から波長 550 nm の観測結果を以下に示す。グラフの色はそれぞれ使用した標準星に対応している。緑色の線は HR8260、青色は HR8698、黄色は HR8232、灰色は HR0248、オレンジ色は HR8414 を標準星として使用したことを表している。

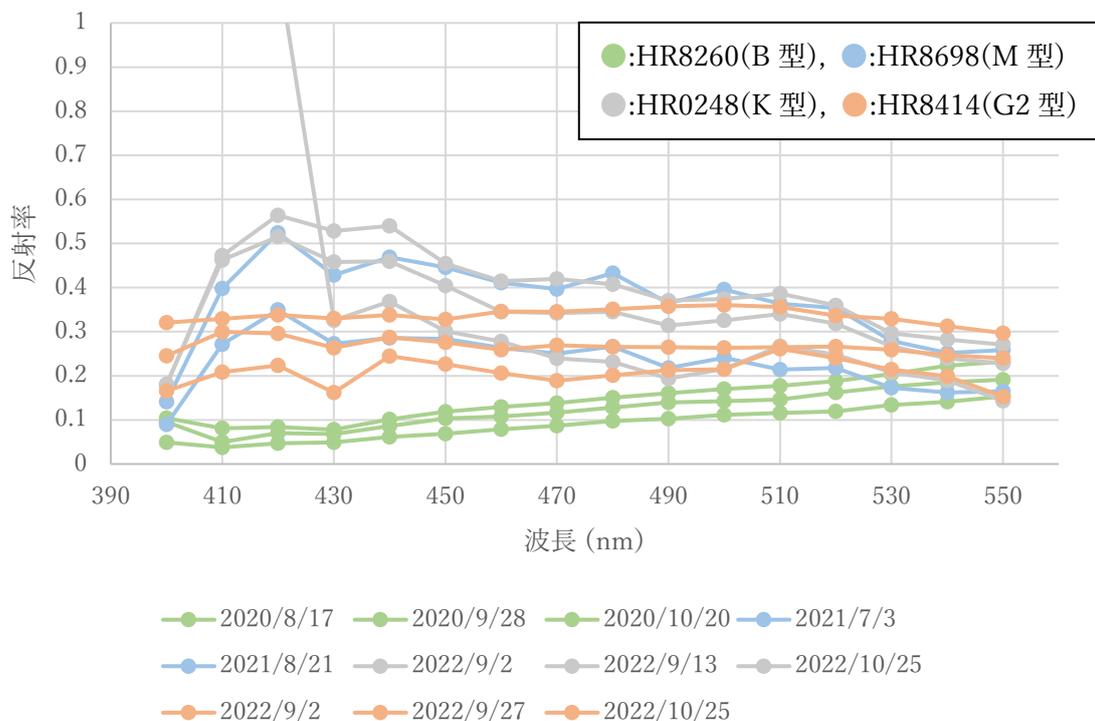


図 4.11 観測面全体に NaCl が存在する領域(経度 45° ~135°)の反射率

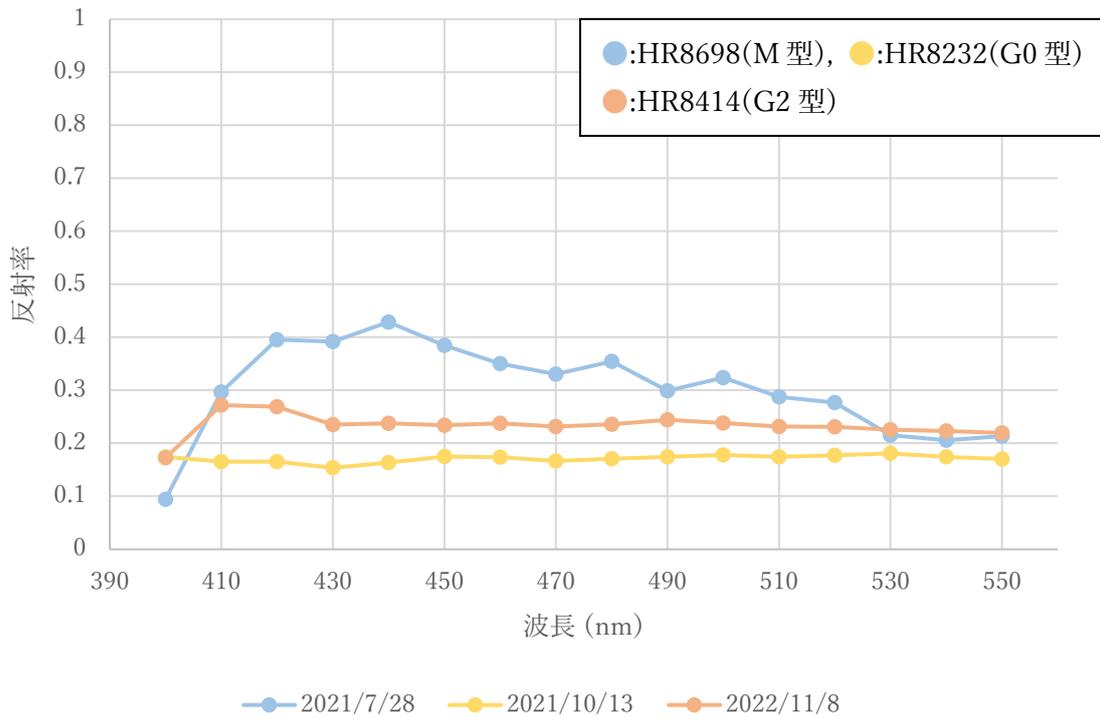


図 4.12 観測面の半分以上に NaCl が存在する領域(経度 $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$, $135^{\circ} \sim 180^{\circ}$)の反射率

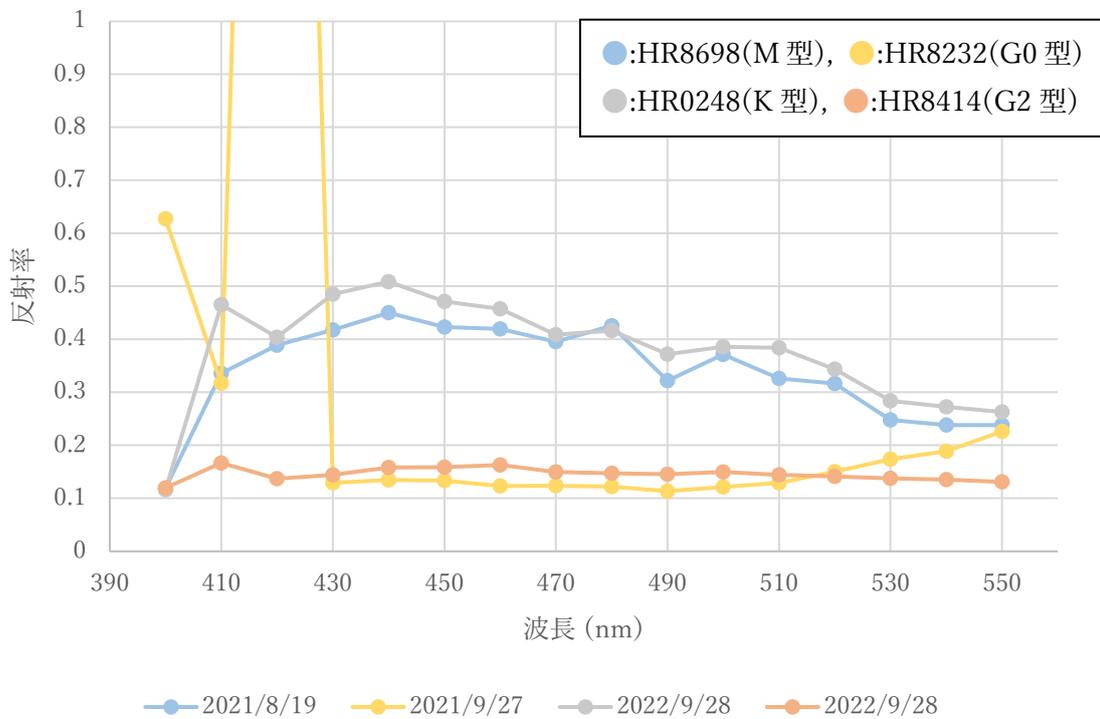


図 4.13 観測面の半分より少なく NaCl が存在する領域(経度 $315^{\circ} \sim 0^{\circ}$, $180^{\circ} \sim 225^{\circ}$)の反射率

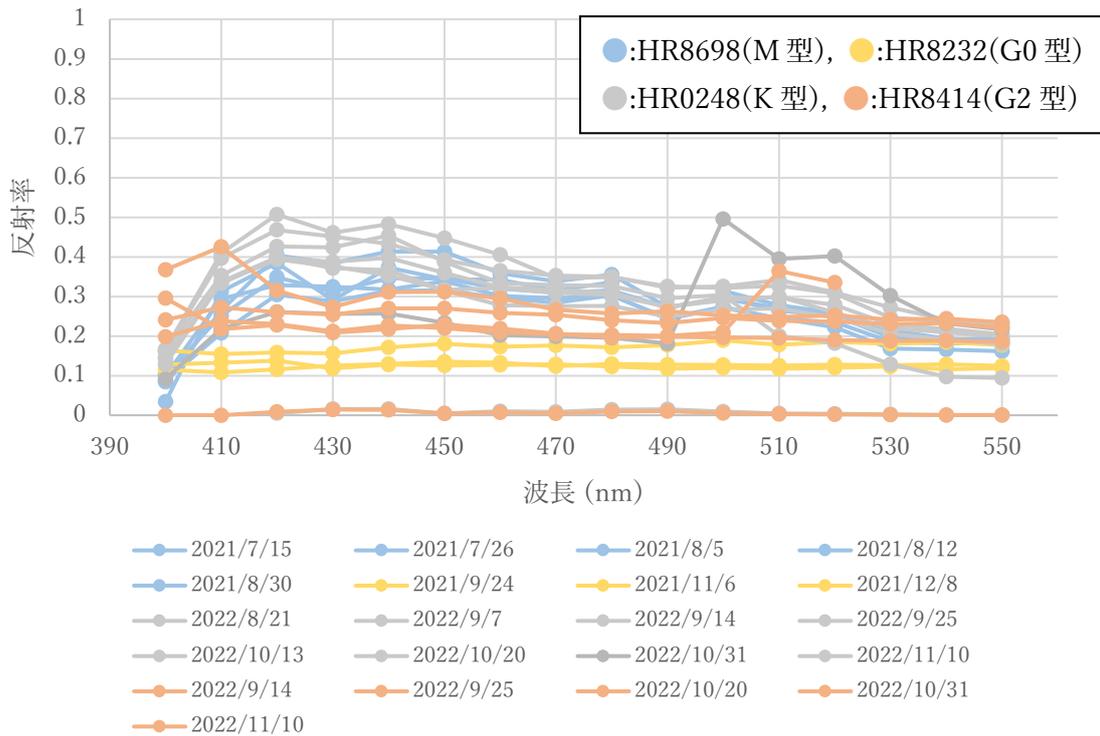


図 4.14 観測面に NaCl が未検出の領域(経度 225° ~315°)の反射率

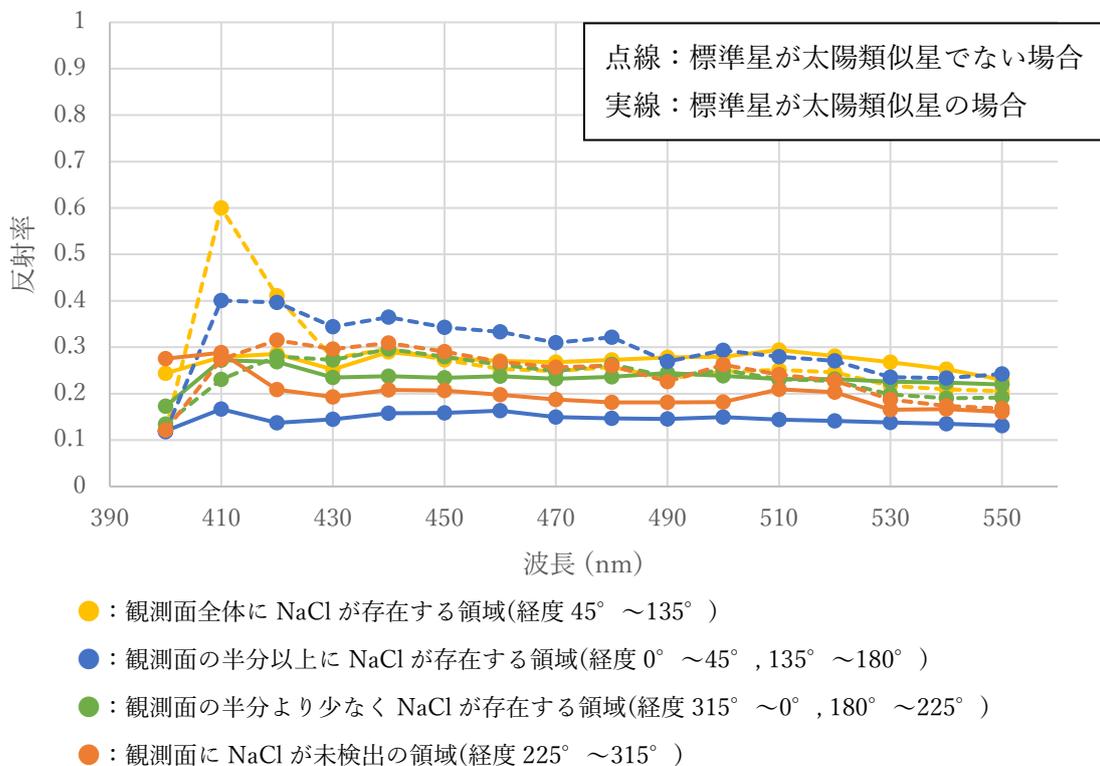


図 4.15 経度ごとの平均反射率

緑色の線は、相対的に反射率が小さい。また、波長が長くなるにつれて、反射率が大きくなる形となっている。青色と灰色の線は波長 420 nm 付近に最大値がある。それ以降、波長が長くなるにつれて反射率が小さくなっている。黄色とオレンジ色の線は相対的に傾きが小さい。

4.2.2 波長 650 nm から 800 nm の解析結果

3.4 で述べた方法で解析した波長 400 nm から波長 550 nm の解析結果を以下に示す。

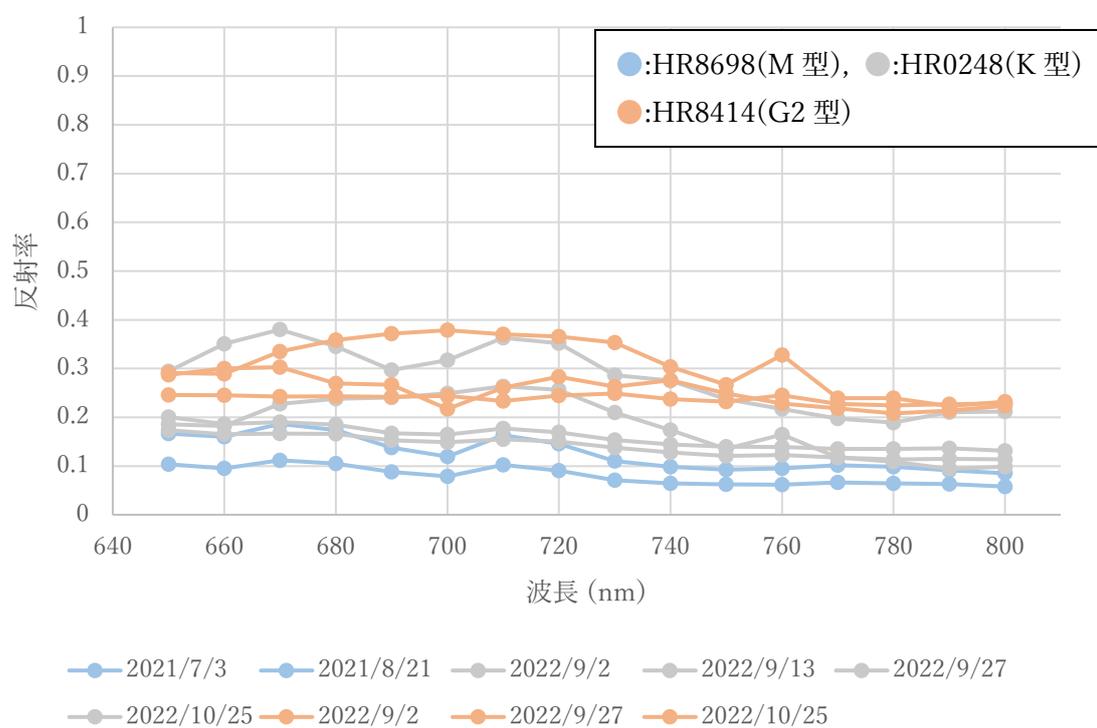


図 4.16 観測面全体に NaCl が存在する領域(経度 45° ~135°)の反射率

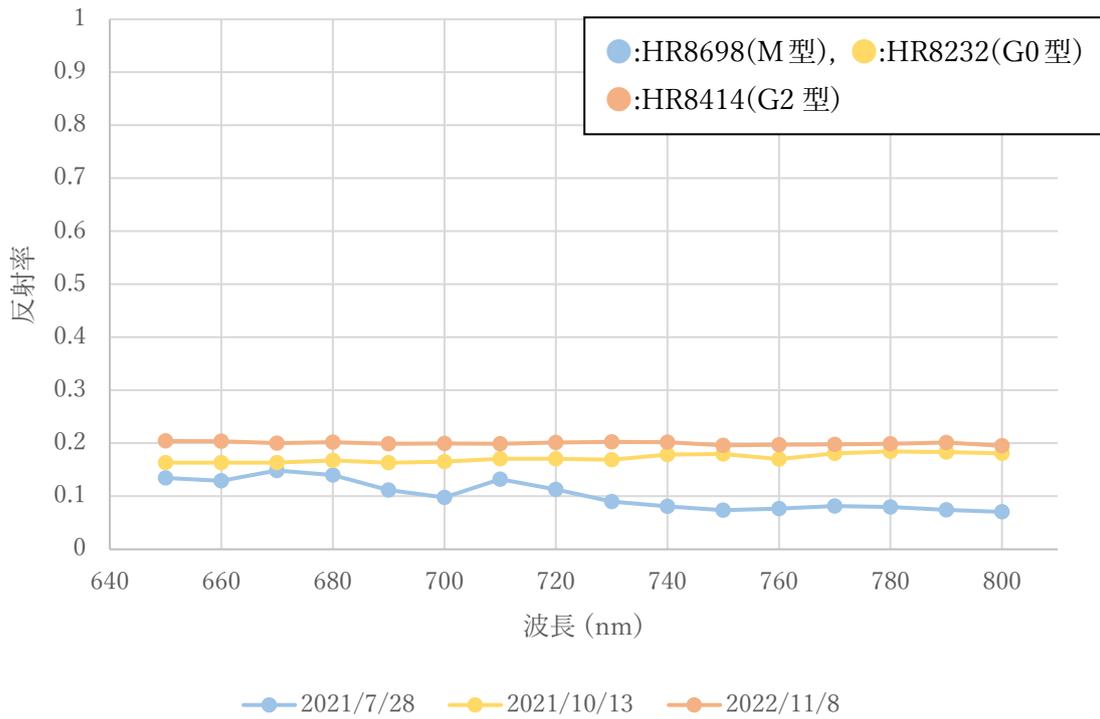


図 4.17 観測面の半分以上に NaCl が存在する領域(経度 $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$, $135^{\circ} \sim 180^{\circ}$)の反射率

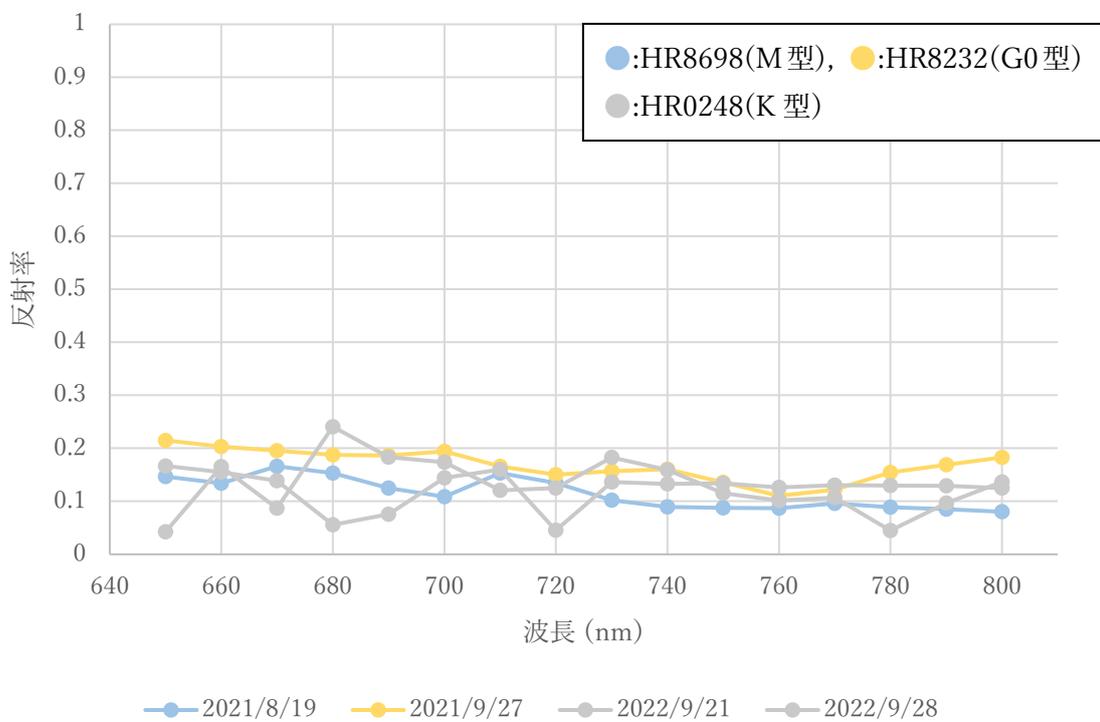


図 4.18 観測面の半分より少なく NaCl が存在する領域(経度 $315^{\circ} \sim 0^{\circ}$, $180^{\circ} \sim 225^{\circ}$)の反射率

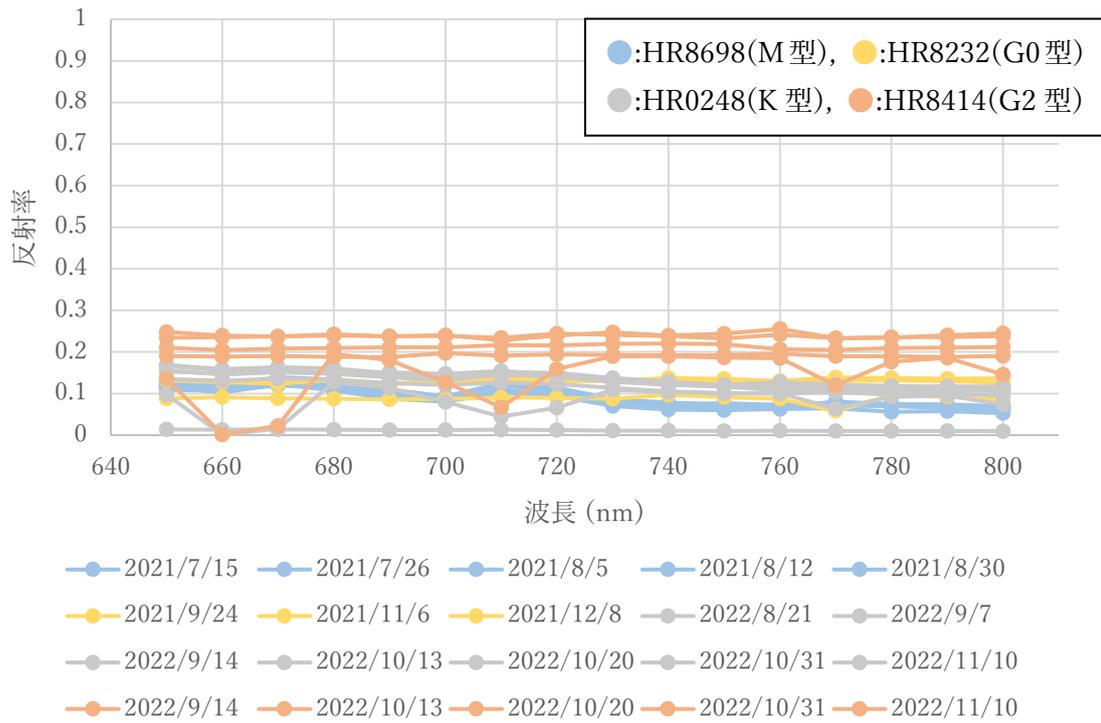


図 4.19 観測面に NaCl が未検出の領域(経度 225° ~315°)の反射率

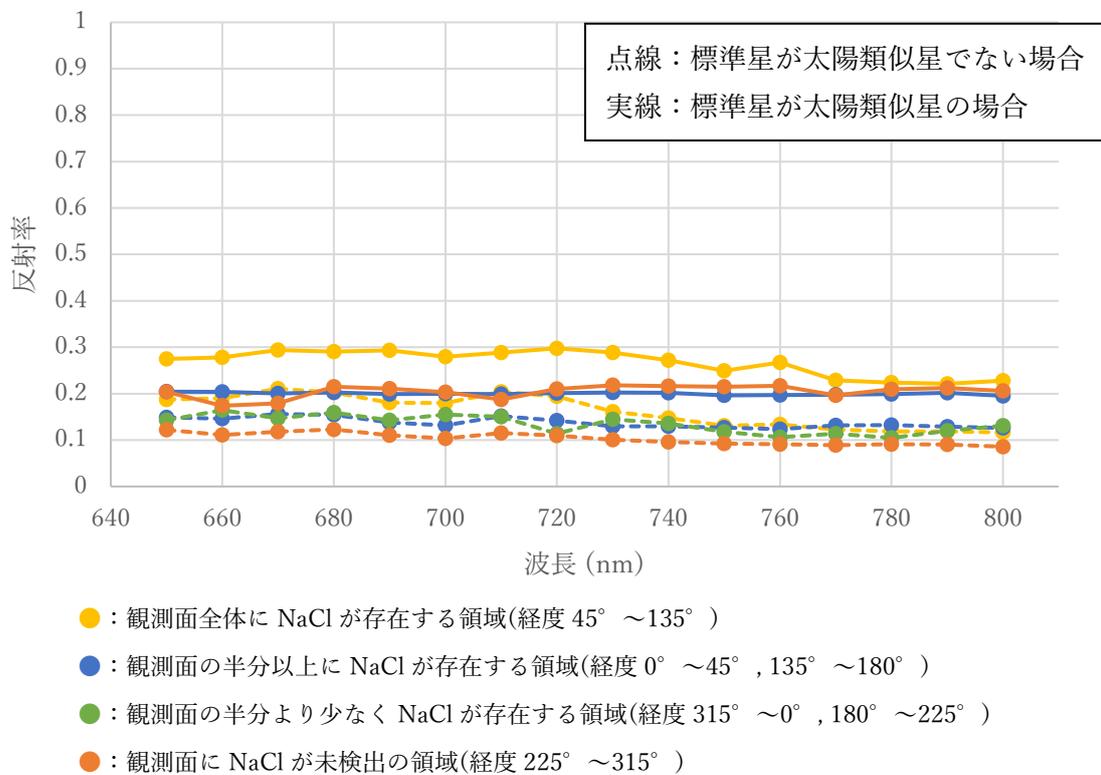


図 4.20 経度ごとの平均反射率

4.2.1 で示した結果に比べて、波長ごとの反射率の差は少ない。また、顕著な凹みも確認できない。4.1.2 の反射率と比べた際に、全体的に反射率が小さい。

第5章 考察

5.1 標準星のスペクトルタイプによる解析結果の違い

4.1 で示したように標準星が太陽類似星ではない場合、波長 430 nm と 490 nm、520 nm、760 nm に凹みが見られた。この原因として考えられるのは、太陽光に存在するフラウンホーファー線である。フラウンホーファー線とは太陽光を分光すると特定の波長で見られる暗線のことである。太陽の大気中に存在する原子やイオンが特定の波長の太陽光を吸収することでフラウンホーファー線を観測することが出来る。特に強く見える暗線には長波長側からアルファベットの大文字の A から順に記号が付けられている。

表 5.1 フラウンホーファー線の記号と要因となっている元素と吸収波長

記号	元素	波長 [nm]
A	酸素	759.370
B	酸素	686.719
C	水素	656.281
D1	ナトリウム	589.594
D2	ナトリウム	588.997
D3	ヘリウム	587.565
E2	鉄	527.039
F	水素	486.134
G	鉄	430.790
G	カルシウム	430.774
H	カルシウム	396.847

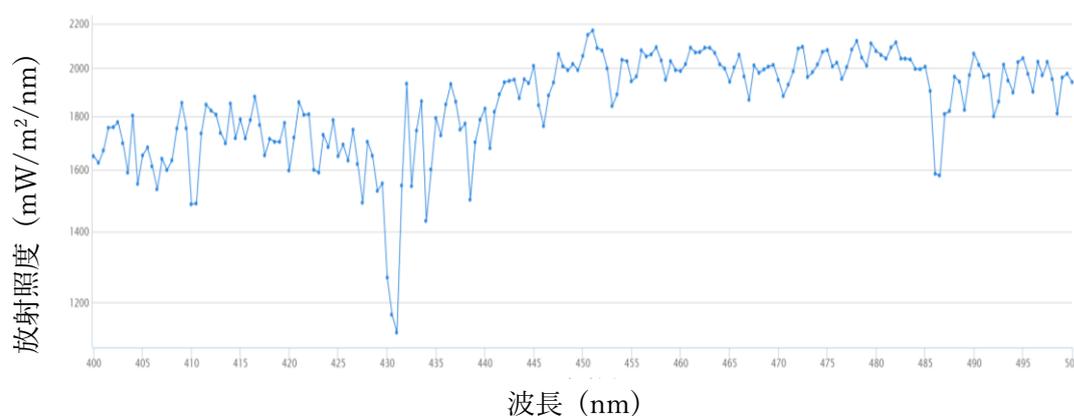


図 5.1 波長域 400 nm から 500 nm までの太陽光スペクトル

[https://lasp.colorado.edu/lisird/data/omi_ssi/]

また、4.1.1 では波長が長くなるにつれて、反射率が大きくなるようなスペクトルの形であったが、これも太陽光のスペクトルと似たような傾向にある。このことから、4.1 の結果は太陽光のスペクトルを反映しているといえる。

一方で、標準星を太陽類似星に設定した 2022 年の結果ではフラウンホーファー線とみられる 430 nm の凹みが一部の観測日で確認できたが、その他の波長での凹みは無くなり、スペクトルの形も傾きが小さくなった。このことから、標準星を太陽類似星に設定した 2022 年の結果は太陽光のスペクトルを反映していないデータが得られたと考えられる。

また、4.2 で示した結果のうち太陽光を標準星に設定した観測日では顕著な凹みは見られず、グラフの傾きも小さいことから、太陽光のスペクトルを反映していないと考えられる。

太陽と同様のスペクトル型である G 型の HR8232(グラフの黄色)、HR8414(グラフのオレンジ色)を使用した結果が最もグラフの傾きが小さい。また、4.1 で示した反射率よりも小さい値が主となっている。

G 型よりも表面温度が低温である M 型の HR8698(グラフの青色)と K 型の HR0248(グラフの灰色)を使用した結果は波長 420 nm 付近で最も反射率が大きくなり、それ以降の波長では反射率が小さくなる傾向にある。これは K 型と M 型の光の強度が G 型よりも小さく、波長 400 nm から 420 nm のスペクトルの傾きも G 型よりも大きいことから起こったものだと考えられる。

また G 型よりも高温である B 型である HR8260(グラフの緑色)を使用した結果は波長が長くなるにつれて、反射率が徐々に大きくなる傾向と他のスペクトルと比べて全体的に反射率が小さい。これは B 型が G 型よりも光の強度が大きく、波長が大きくなるにつれて下がる光の強度の傾きが G 型よりも大きいことから起こっていると考えられる。

よって、この方法では G 型以外の恒星を標準星として場合は太陽と標準星のスペクトルの差の影響を受けていると考えられる。

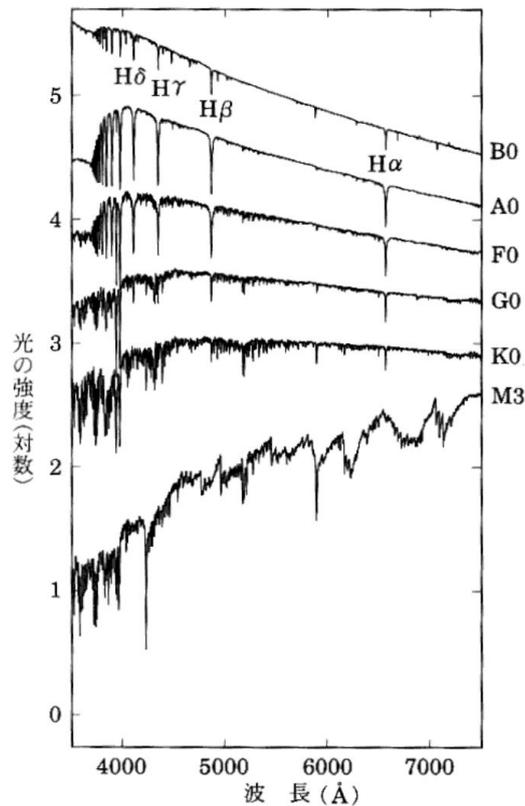


図 5.2 スペクトル分類と連続エネルギー分布 [シリーズ現代の天文学 7 恒星]

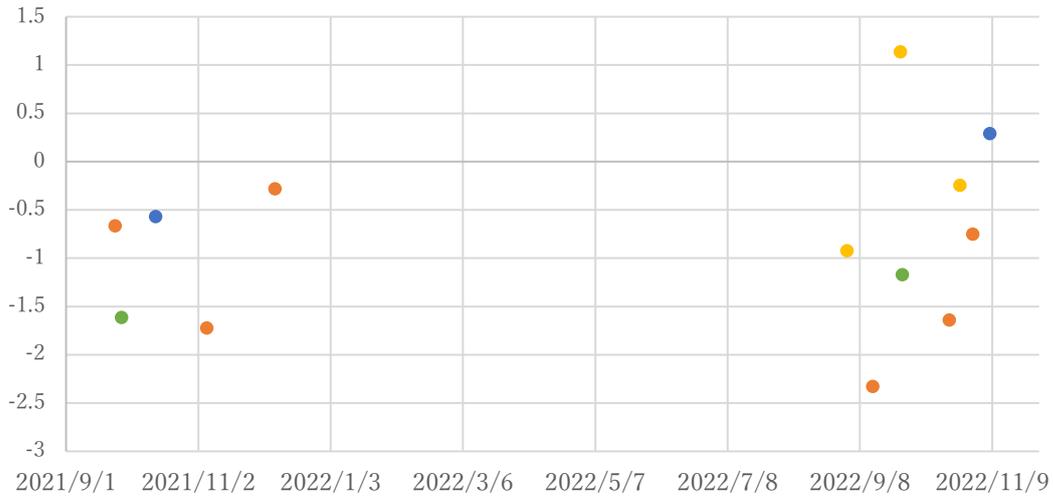
5.2 波長 450 nm と 460 nm、720 nm における吸収の有無

波長 450 nm と 460 nm、720 nm における吸収度を式(5),(6)を用いて見積もった。ここで、 $\alpha(\lambda)$ は吸収波長における吸収度、 $R_{\text{obs}(\lambda)}$ は吸収波長での反射率、 $R_{\text{ave,exc}}$ は吸収波長における反射率を除いた平均反射率、 σ_{exc} はその標準偏差、 n_{exc} はそのデータ数である。

$$\alpha = \frac{R_{\text{ave,exc}} - R_{\text{obs}(\lambda)}}{\sigma_{\text{exc}}} \quad \dots(5)$$

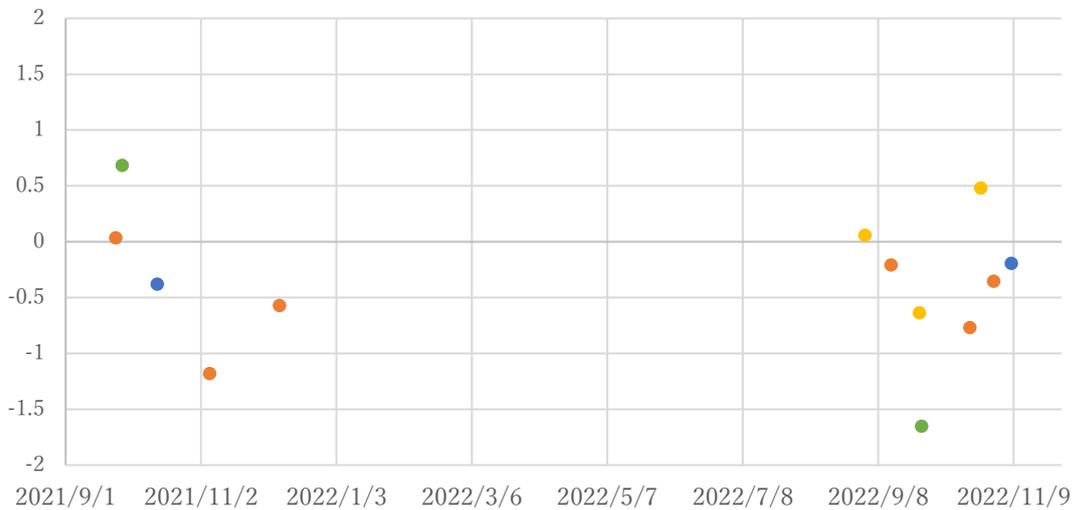
$$\sigma_{\text{exc}} = \sqrt{\frac{1}{n_{\text{exc}}} \sum (x - \bar{x})^2} \quad \dots(6)$$

図 5.3 から図 5.5 は 4.2 の G 型の標準星を使用した観測結果に対する、 α の時間変動である。



- : 観測面全体に NaCl が存在する領域(経度 45° ~135°)
- : 観測面の半分以上に NaCl が存在する領域(経度 0° ~45° , 135° ~180°)
- : 観測面の半分より少なく NaCl が存在する領域(経度 315° ~0° , 180° ~225°)
- : 観測面に NaCl が未検出の領域(経度 225° ~315°)

図 5.3 波長 450 nm の吸収評価 α の変動



- : 観測面全体に NaCl が存在する領域(経度 45° ~135°)
- : 観測面の半分以上に NaCl が存在する領域(経度 0° ~45° , 135° ~180°)
- : 観測面の半分より少なく NaCl が存在する領域(経度 315° ~0° , 180° ~225°)
- : 観測面に NaCl が未検出の領域(経度 225° ~315°)

図 5.4 波長 460 nm の吸収評価 α の変動



- : 観測面全体に NaCl が存在する領域(経度 45° ~135°)
- : 観測面の半分以上に NaCl が存在する領域(経度 0° ~45° , 135° ~180°)
- : 観測面の半分より少なく NaCl が存在する領域(経度 315° ~0° , 180° ~225°)
- : 観測面に NaCl が未検出の領域(経度 225° ~315°)

図 5.5 波長 720 nm の吸収評価 α の変動

先行研究で確認された吸収波長 450 nm において統計的に有意といえる 3 を超える観測日はなかった。一方で、最も値が大きかったのは観測面全域に NaCl が存在する領域を観測した日であり、最も小さかったのは観測面で未検出の領域を観測した日であった。

また、室内実験で確認された吸収波長 460 nm において統計的に有意といえる 3 を超える観測日はなかった。最も α が大きい日は観測面の半分以下に NaCl が堆積している領域を観測した日であった。

波長 720 nm においても最も α が大きい日は観測面に NaCl が未検出の領域を観測した日である。

波長 720 nm に吸収が見られないことを調査するために再度実験が行われた[Denman et al., 2022]。放射線照射と同時に光を照射した時にフォトブリーチング(光退色)が起こり、F センターの破壊が起き、吸収が減衰することが分かった(図 5.6)。これにより、M センターの形成に必要な F センターの密度が不足し、M センターが形成しないことが実験的に証明された。また、この現象はエウロパ上では日中と夜の間で繰り返し起こることも指摘された(図 5.7)。

このため、観測面全域に NaCl が存在する領域で波長 720 nm の吸収度が統計的に有意でなかったことはこの実験結果に一致しているといえる。

今回の結果は MSI を用いた簡易分光では、エウロパ表面の NaCl の吸収を捉えることが出来なかった。そのため、今後は可視光分光器を開発し、観測を行う必要がある。

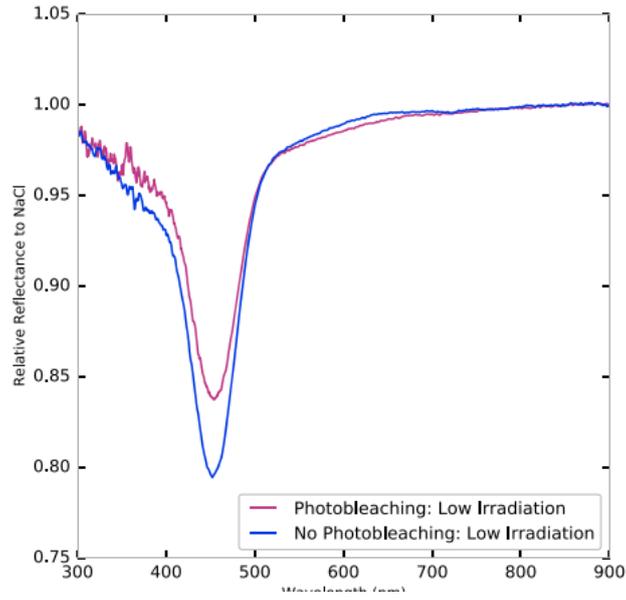


図 5.6 フォトブリーチングの有無によるスペクトルの違い [Denman et al., 2022]

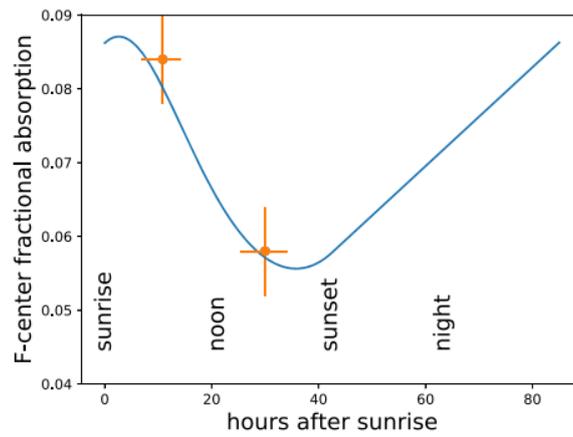


図 5.7 F センターの吸収とエウロパの自転周期の数値モデル [Denman et al., 2022]

第6章 まとめ

木星衛星エウロパの表面には、マグネシウムやナトリウムの硫酸塩や炭酸塩などの水和物といった塩類の存在が木星探査機ガリレオの赤外分光観測から推測されている [McCord et al., 2010]。また、地殻褐色化の原因とされてきた塩化ナトリウムの存在もハッブル宇宙望遠鏡(HST)の可視分光観測から明らかになった [Trumbo et al., 2019]。地表面に存在が示唆されるそれらの物質は、氷地殻下に隠された地下海から表出したと思われる地形に集中していることから、①岩石質のマントルと接する海底には岩石と液体水との相互作用が行われる環境が存在し、岩石成分が塩分として液体水に溶出、②それらが凍りながら地下海を上昇、③-1:氷地殻まで到達し表出、または③-2:間欠泉として噴出、という要因が考えられている。しかし、過去の探査機や宇宙望遠鏡による限られた観測時間では、表面に存在する物質の時間変動を追えず、物質の起源や衛星の進化過程について理解は停滞している。

本研究では、北海道大学が所有するピリカ望遠鏡と搭載マルチスペクトル撮像装置(MSI)を用いて、2020年から2022年にかけてエウロパの撮像観測(400-550 nm, 650-800 nm)を実施した。

得られたデータを標準星のカタログフラックスを用いた地球大気補正とエウロパの立体角と標準星の等級を用いた地球大気補正の2つの方法で処理した。また、HSTによる先行研究が示した塩化ナトリウムの吸収波長である450 nmの吸収の強さによって観測した結果を4つの領域に分類した。

結果として、地球大気補正に使用した標準星のスペクトルタイプによって、エウロパのスペクトルの特徴が変化した。また4つの領域を比較した際に大きな違いは見られなかった。その中で、標準星を太陽類似星に設定した場合のデータを用いて、塩化ナトリウムの吸収波長の450 nm、460 nm、720 nmにおける吸収を評価した。それぞれ、統計的に有意だとみられる吸収は確認できなかった。しかし、450 nmの吸収が最も大きかった観測日はNaClが全体に分布している経度であり、最も小さかった観測日はNaClが未検出である経度であった。

今後、地上観測を行う場合は分光器を用いて、エウロパのスペクトルの変動を観測することが必要である。

謝辞

本研究に際しまして、多くの方々からご指導、ご協力を頂きました。

指導教員の高木聖子講師にはピリカ望遠鏡に関する基本的な知識だけでなく、研究発表の直前は多くの時間を割き、様々なアドバイスをしていただきました。

高橋幸弘教授には研究テーマの決定や進め方の指導だけでなく、多角的な視点を持つ重要性を教えて頂きました。

惑星宇宙グループの皆様には研究に対する助言や、日々の研究生活において日々大変お世話になりました。

この場を借りて感謝の意を表させていただきます。

参考文献

- Lorenz Roth, Joachim Saur, Kurt D. Retherford, Darrell F. Strobel, Paul D. Feldman, Melissa A. McGrath, Francis Nimmo (2014), Transient Water Vapor at Europa's South Pole., *Science* Vol. 343, 171-174
- Samantha K. Trumbo, Michael E. Brown, Kevin P. Hand (2019), Sodium chloride on the surface of Europa., *eaaw7123*.
- Thomas B. McCord, Gary B. Hansen, Dennis L. Matson, Torrence V. Johnson, James K. Crowley, Fraser P. Fanale, Robert W. Carlson, William D. Smythe, Patrick D. Martin Charles A. Hibbitts, James C. Granahan (1999), Hydrated salt minerals on Europa's surface from the Galileo near - infrared mapping spectrometer (NIMS) investigation., *Journal of Geophysical Research: Planets* Volume 104.
- Thomas B. McCord, Gary B. Hansen, Jean-Philippe Combe, Paul Hayne (2010), Hydrated minerals on Europa's surface: An improved look from the Galileo NIMS investigation., *Icarus* Volume 209, 639-650.
- Henry B. Garrett, Steven M. Levin, Scott J. Bolton, Robin W. Evans, Bidushi Bhattacharya (2004), A revised model of Jupiter's inner electron belts: Updating the Divine radiation model., *Geophysical Research Letters* Volume 32.
- H. B. Garrett, M. Kokorowski, I. Jun (2012), Galileo Interim Radiation Electron Model Update—2012., *JPL Publication* 12-9.
- Michael J. Poston, Robert W. Carlson, Kevin P. Hand (2017), Spectral Behavior of Irradiated Sodium Chloride Crystals Under Europa-Like Conditions., *Journal of Geophysical Research: Planets*, 122, 2644–2654.
- C.A. Hibbitts, K. Stockstill-Cahill, B. Wing, C. Paranicas (2019), Color centers in salts - Evidence for the presence of sulfates on Europa., *Icarus* Volume 326, Pages 37-47
- Makoto Watanabea, Yukihiro Takahashia, Mitsuteru Satoa, Shigeto Watanabea, Tetsuya Fukuharaa, Ko Hamamotoa, Akihito Ozaki (2012), MSI: a visible multi-spectral imager for 1.6-m telescope of Hokkaido University
- Robert M Nelson, Douglas B Nash (1979), Spectral Reflectance Change and Luminescence of Selected Salts During 2-10 KeV Proton Bombardment: Implications for Io., *ICARUS* 39, 277-28
- K. P. Hand, R. W. Carlson (2015), Europa's surface color suggests an ocean rich with sodium chloride., *Geophysical Research Letters* 42, 3174–3178
- C.A. Hibbitts, K. Stockstill-Cahill, B. Wing, C. Paranicas (2019), Color centers in salts - Evidence for the presence of sulfates on Europa., *Icarus* 326, 37-47
- Samantha K. Trumbo, Michael E. Brown, Patrick D. Fischer, and Kevin P. Hand

(2017), A New Spectral Feature on the Trailing Hemisphere of Europa at $3.78\mu\text{m}$., The Astronomical Journal, Volume 153, Issue 6, article id. 250, 5 pp.

- William T. P. Denman, Samantha K. Trumbo, and Michael E. Brown (2022), The Influence of Temperature and Photobleaching on Irradiated Sodium Chloride at Europa-like Conditions., The Planetary Science Journal, Volume 3, Issue 2, id.26, 6 pp.
- Shuya Tan, Yasuhito Sekine, Masayuki Kuzuhara (2022), Spatially resolved observations of Europa's surface with Subaru/IRCS at $1.0 - 1.8 \mu\text{m}$: Upper limits to the abundances of hydrated Cl-bearing salts., eprint arXiv:2203.08995