

## 火星極冠の消長 ～極冠消長から解る大気循環とダストストームの影響～

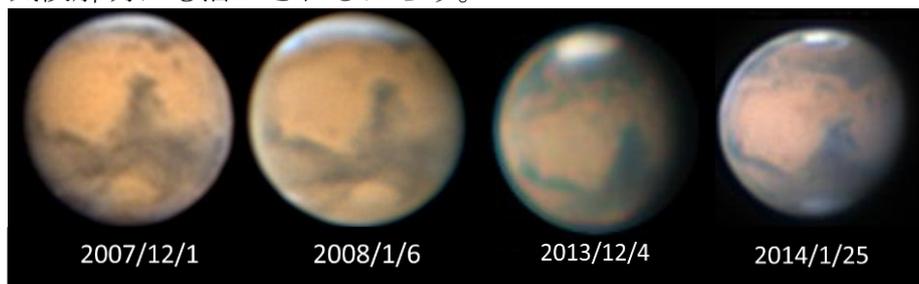
熊本県立第一高等学校 地学部

### 1. 要旨

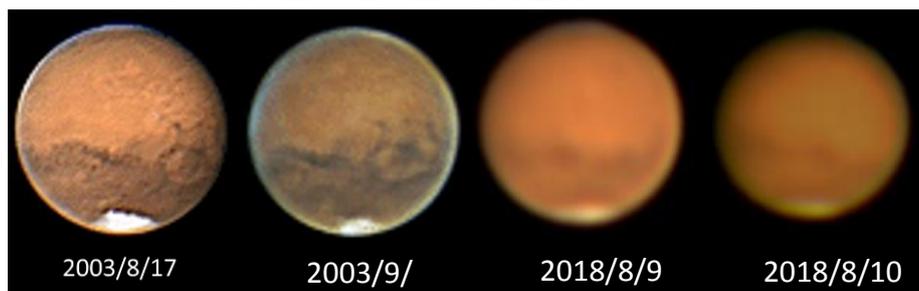
2018年の研究では、南極冠の縮小について調べた。極冠の面積測定には、観測時の中央経度を揃える必要がある。そこで、(図1、図2)のように私たちが撮影した画像に加え、世界中から精細に撮影された画像を集め、南北両極冠の面積変化を調べた。(図2)の2018年の画像は私たちが撮影したものである、このとき火星では大規模なダストストームが発生した。極冠縮小の主な原因は、太陽放射エネルギーである。今年度は、火星の1年を通しての極冠消長を太陽放射エネルギー量や大気圧の変動と合わせて考察し、ダストストームの影響についても考察した。

- 極冠は太陽放射エネルギー量に反比例するように縮小し、最縮小は夏至から遅れる。太陽放射を受けて火星表面や大気が温まるまでに時間がかかることや、大気圧が低いことが原因である。
- 火星の大気圧は、春分や夏至、秋分、冬至からそれぞれ遅れて増減する。大気圧変動は両極冠の消長と関係する。
- 両極冠の合計面積は、大気圧変動と調和する。太陽放射の増加で極冠が縮小して大気圧が増大する。太陽放射が減少しても極冠は直ぐに増大しない。大気と極冠を含めたCO<sub>2</sub>量は、両極冠が共に増大できるほど多くない。
- ダストストームは、南極冠の縮小を促進させた。火星大気中のダストは大気を暖め、温暖化させている。

地球以外の地球型惑星の気候や太陽放射エネルギー等との関係を調べ、気候変動を明らかにすることは、地球の気候や気候変動の解明にもつながる。今回の研究は、太陽系外の地球型惑星の気候解明にも活かされるだろう。



(図1)火星の北極冠(中央経度 290～310°)



(図2)火星の南極冠(中央経度 120～140°)

## 2. 研究目的

2018年7月31日の火星最接近では視直径が24秒を超え、2018年1月の5倍以上となった。私たちはこの機会に火星を撮影し、南極冠の大きさの変化について調べた。南極冠は次第に縮小し、その主な原因は極が受ける太陽放射エネルギー量であることが分かった。昨年の観測で得られた南極冠の縮小だけでなく、それ以前に撮影された火星の画像を調べ、北極冠を含めた両極冠の消長の様子や極が受ける太陽放射エネルギー量、火星探査機によって観測された火星大気圧の変動との関係などを考察し、明らかになっていない火星極冠の増大の様子を含めた極冠の消長について追及する。また、2018年に発生した大規模なダストストームの影響も明らかにする。

以下に、観測期間や調査期間、観測場所、観測で使用した機材等について示す。

観測期間：2018年8月9日～2018年10月13日

調査期間：2003年5月15日～2019年2月27日

観測場所：熊本県立第一高等学校屋上・熊本県立第二高等学校天文台  
熊本県立天草青年の家駐車場

観測機材：Celestron C8(口径20cm, 焦点距離2000mm)、2倍バローレンズ  
VIXEN GP-D 赤道儀、スカイセンサー2000PC コントローラー  
ZWO ASI290MC(1/2.8" CMOS カラーカメラ)

### 3. 研究方法

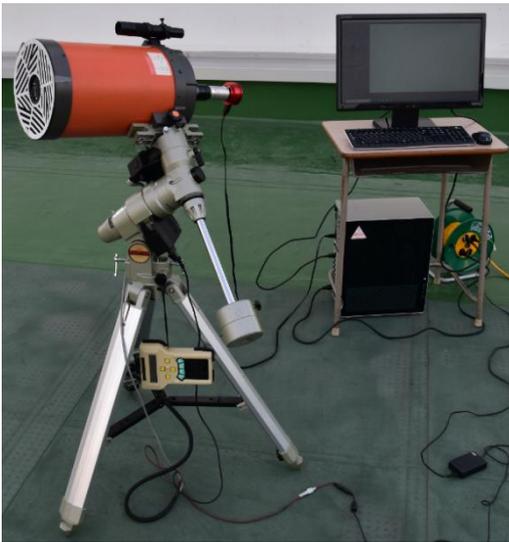
惑星は見かけの大きさである視直径が小さく、表面の模様や極冠などがはっきりしない。静止画のみでは精細に撮影することができないため動画で撮影した。

#### (1) 火星の撮影

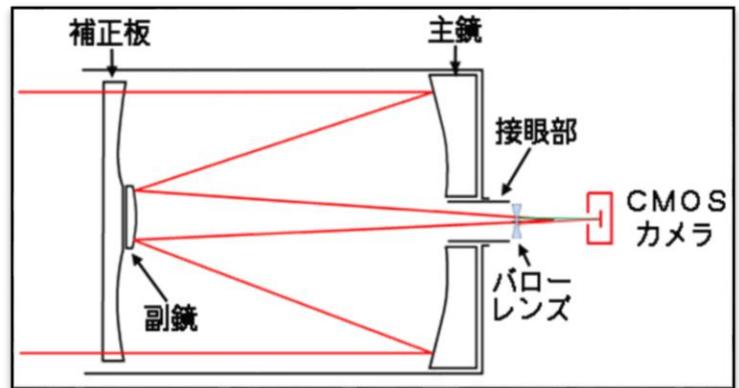
(図 3、図 4)に火星撮影に使用した機材を示す。天体望遠鏡は、学校所有の口径 20 cm、焦点距離 2mのシュミットカセグレン望遠鏡である。バローレンズを組み合わせて2mの焦点距離を2倍に伸ばした拡大光学系とした。

動画の撮影に用いる CMOS カメラは、ASI イメージカメラである。

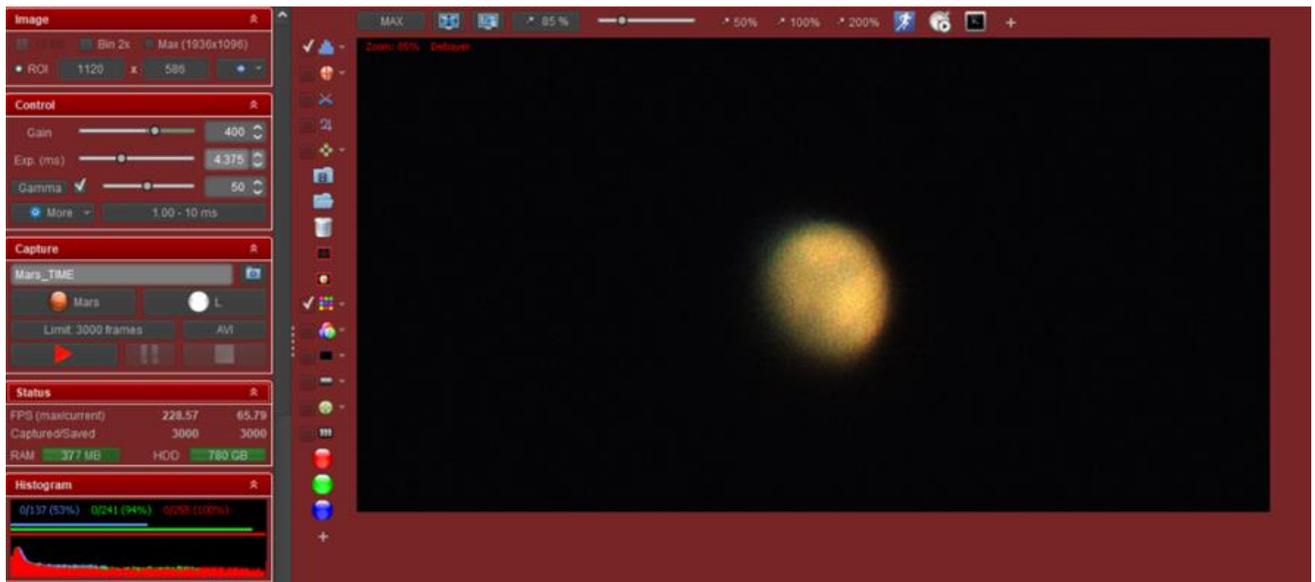
CMOS カメラの動画データは撮影ソフト「Fire Capture」(図 5)を使用して、1000 フレーム以上の静止画を連続的に動画として記録した。



(図 3) 観測機材



(図 4) 望遠鏡のしくみ

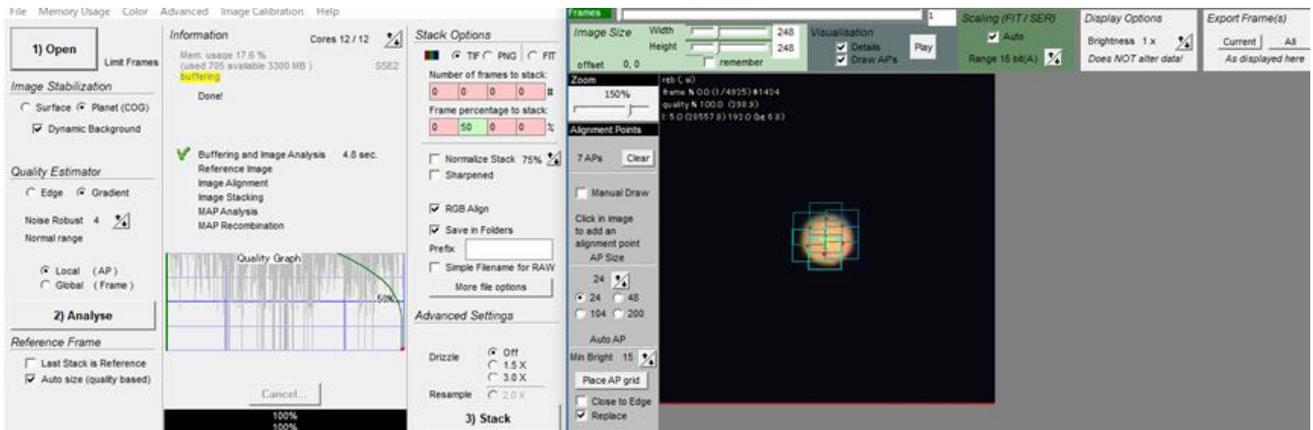


(図 5) Fire Capture

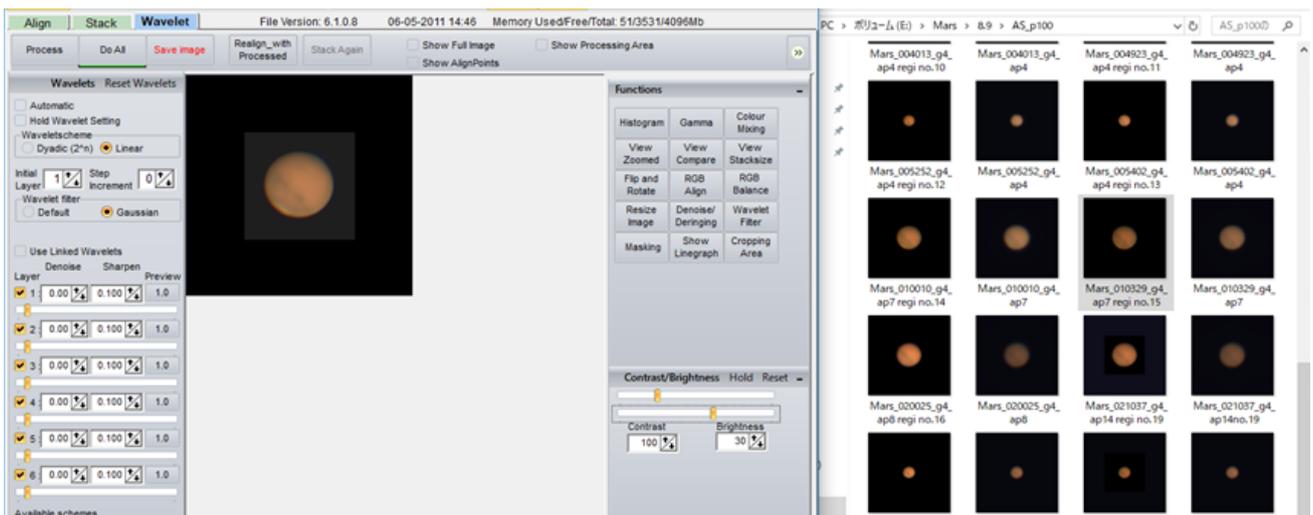
## (2) 画像処理

動画データは動画スタックソフト「AutoStakkert!2」(図6)を使用し、数百から数千フレームを抽出しコンポジットした。

コンポジットで生成された静止画像は天体画像処理用ソフト「Registax6」(図7)を使用し、精細な模様を復元した。



(図6)AutoStakkert!2

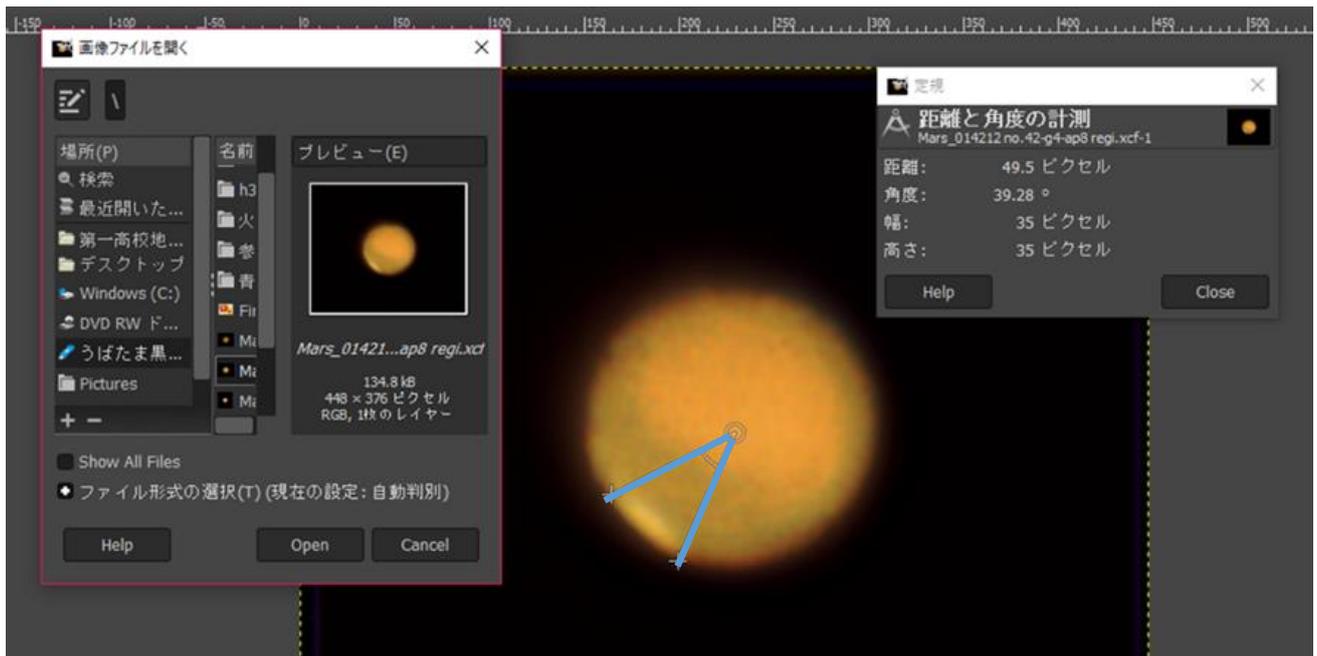


(図7)Registax6

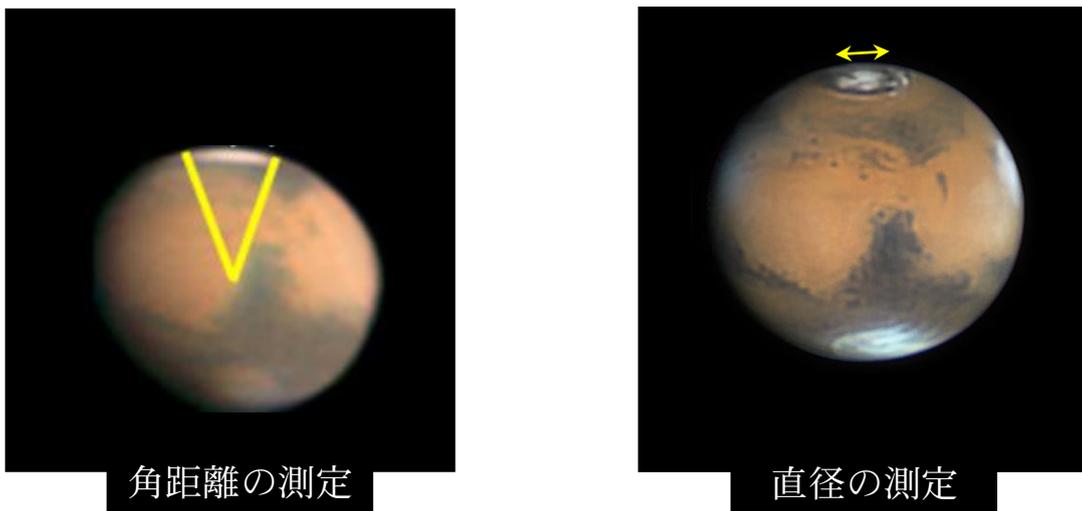
## (3) 極冠の大きさの測定方法

火星の極冠の大きさを測定するため極冠の角距離を測定する。画像処理ソフト「GIMP2.10」(図8)を使用し、火星とその極冠を円と仮定し、火星の直径から火星の中心を決め、火星の中心から角度を測り角距離とした。測定ではより正確な値を出すために5回測定し、その平均を取った。

2014年3月17日～2014年6月7日の期間は北極冠全体が見えていたため、(図9)のように角距離を用いた測定ではなく、火星の直径と北極冠の直径の比を用いた測定によって極冠面積を求めた。



(図 8) GIMP2. 10



(図 9) 極冠面積の測定方法の違い

#### (4) 観測時の中央経度を揃えた火星画像の収集

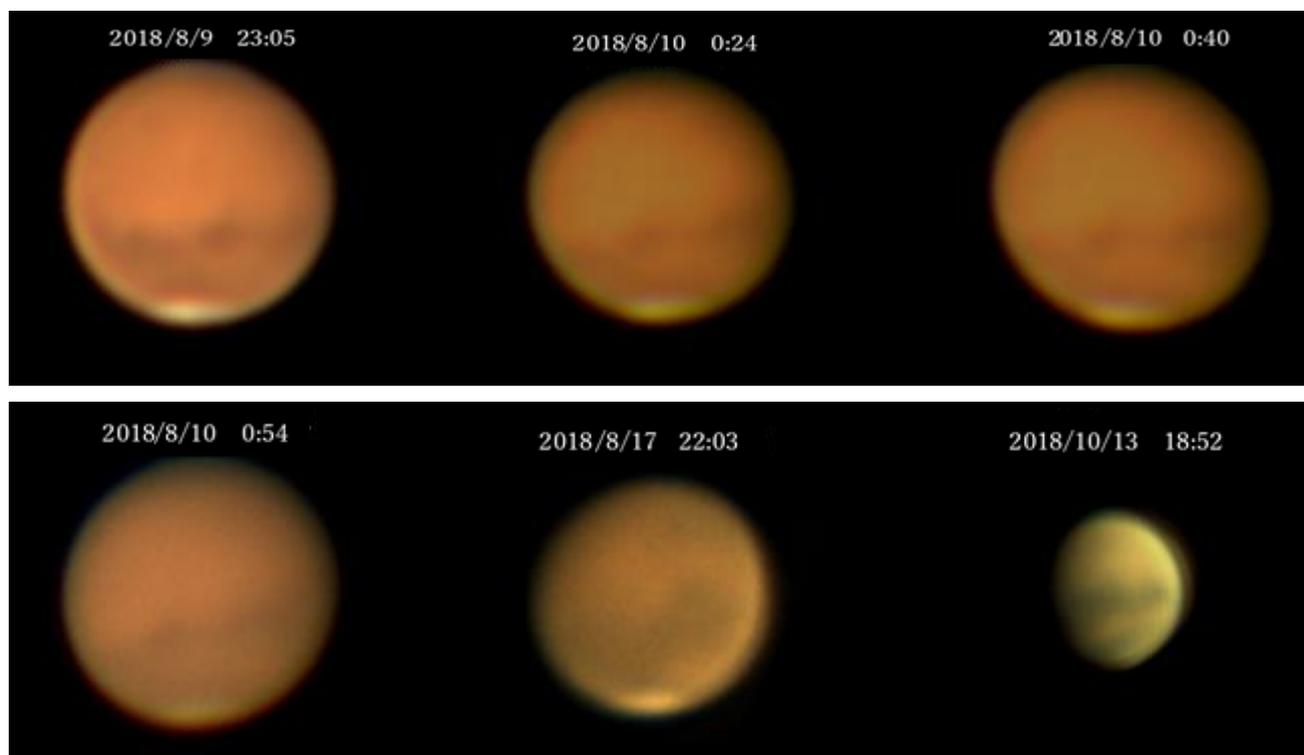
惑星や天体の観測・研究を行い、観測スケッチや写真・画像のアーカイブを行っている月惑星研究会や東亜天文学会などに世界中から投稿され、それぞれの HP に掲載されている火星の画像を調べた。撮像に CCD や CMOS センサが使用され、精細に撮影された 2003 年の火星大接近以降の画像を収集した。

#### 4. 結果

##### (1) 撮影した火星の画像

2018年の火星大接近では、火星表面に大規模なダストストームが発生し、画像処理を行っても精細な表面の観察は困難であった。しかし、(図10)に示す私たちが撮影したデータでも南極冠の縮小を観察することができた。

今回の研究で私たちが撮影することができた火星の画像は65枚であった。



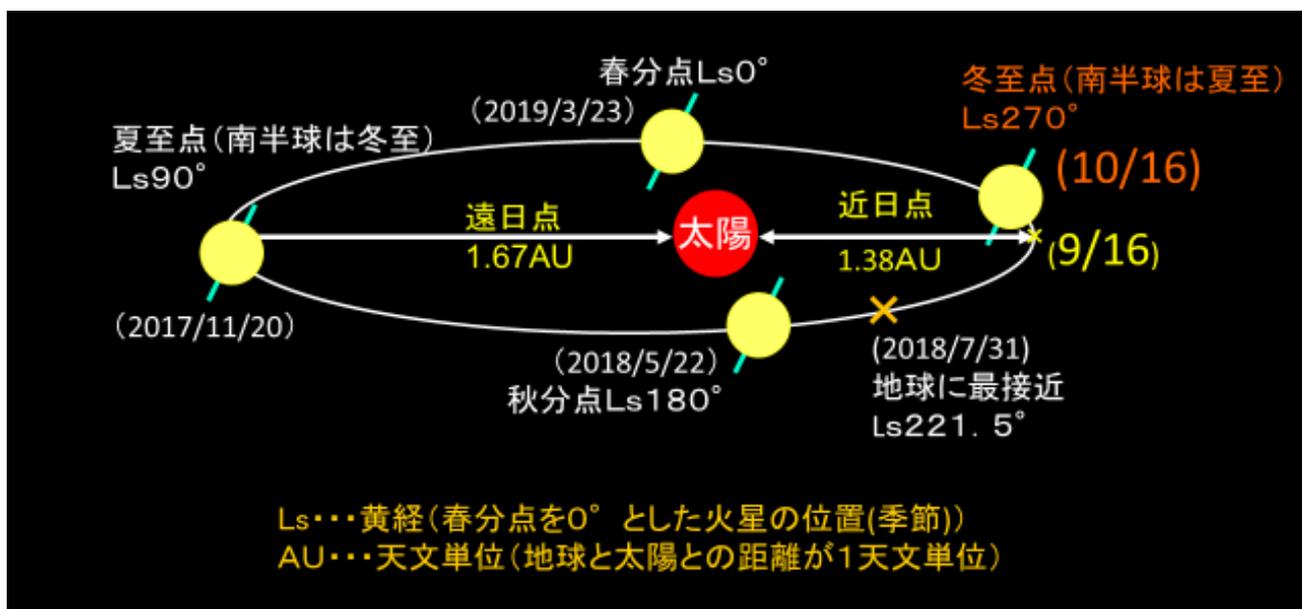
(図10) 私たちが撮影し処理した画像の一部

## (2) 火星の公転と軌道、自転軸等について

2018 年の大接近前後の火星の動きについて調べた。(図 11)に火星の公転軌道と自転軸を模式的に示す。

火星は太陽を 1 つの焦点とする離心率が大きい楕円軌道を描き、遠日点距離は近日点距離の 1.19 倍である。また、自転軸は公転面に垂直ではないため季節変化があり、北半球と南半球では季節が反転する。夏季には極が太陽放射を終日受け続け、冬季には全く受けない。

火星の季節を表す値に黄経がある。これは火星の春分点を  $0^\circ$  とし、火星の位置を角度で表したものであり、黄経は  $L_s$  で示される。 $L_s 90^\circ$  は夏至、 $L_s 180^\circ$  は秋分、 $L_s 270^\circ$  は冬至である。火星と太陽との距離が最も近い近日点距離は 1.38AU で、 $L_s 251^\circ$  の近日点通過は 2018 年 9 月 16 日である。 $L_s 270^\circ$  の南半球の夏至は 10 月 16 日で、近日点通過に近いが 1 ヶ月遅れる。遠日点距離は 1.67AU で、 $L_s 71^\circ$  の遠日点通過は 2017 年 10 月 8 日である。 $L_s 90^\circ$  の北半球の夏至は 11 月 20 日で、遠日点通過に近いが約 1 ヶ月遅れる。このことから、火星極冠の縮小や増大は火星の太陽との距離や、火星の自転軸の傾きから起こる季節変化と関係があるのではないかと考えた。



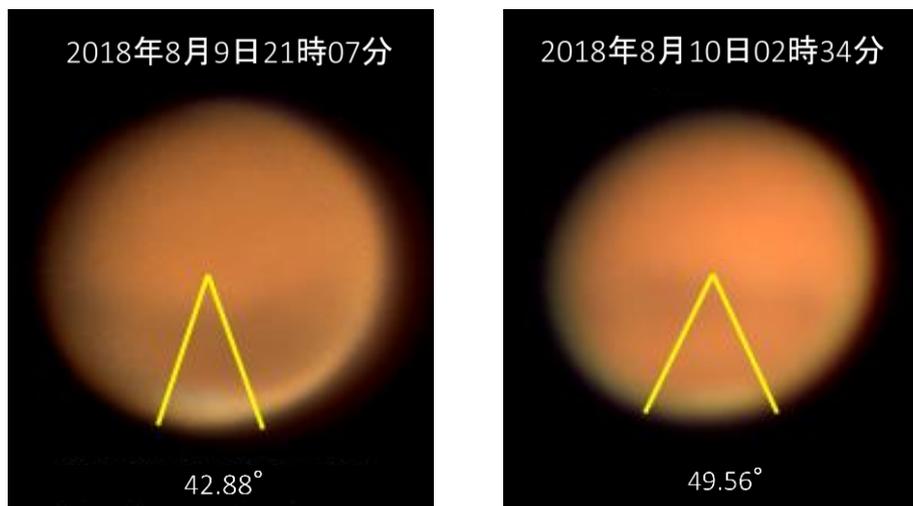
(図 11) 火星の公転軌道と自転軸

### (3)南極冠の大きさの正確な測定方法

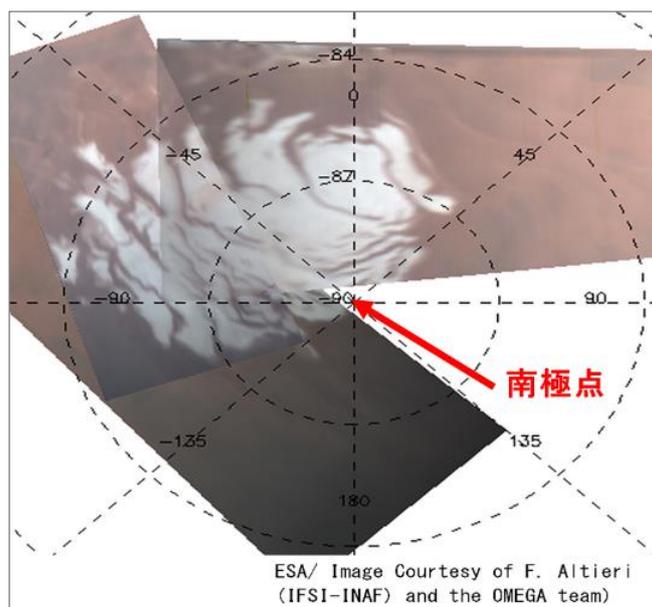
(図 12)は、一晩の間に撮影した二つの火星の画像である。これらより、火星の自転のため南極冠の見かけの大きさは一晩の間でも変化することがわかる。

また、(図 13)にヨーロッパ宇宙機関の火星探査機マーズ・エクスプレスの調査結果を示す。(図 12、図 13)から、南極冠は真円ではないことや極冠分布の中心が極からずれていることがわかる。

このため、南極冠の大きさの正確な変化を調査するには観測するときの中央経度を決める必要がある。中央経度とは火星を見たときの火星の中心にくる経度のことである。今回私たちが撮影した 65 枚の画像のうち、中央経度が揃ったものが  $130^\circ$  前後であったため、基準となる中央経度を  $130^\circ$  とした。



(図 12)南極冠の形と位置



(図 13)南極冠の分布と南極点

(4) 中央経度について

(図 14)に日本で中央経度 130° の火星が見える時刻を示す。火星の自転周期は約 24 時間 40 分で、地球より少し長い。火星の同じ中央経度を観測できる時刻は 1 日に 1 回で、その時刻は 1 日約 40 分ずつ遅くなっていく。地球上の同じ地点で同じ中央経度の火星を観測できるのは、火星の衝の前後の最大 18 日間であり、衝の前後で観測できる時間は徐々に短くなっていく。さらに、中央経度を揃えると、日本では観測できない期間が生じる。

私たちの観測では火星の中央経度が 130° になる時間は主に夜中であり、学校生活のため、観測できない日があった。学校が休みで天気が良好だった日をピンクで示している。この通り実際に観測できる日はかなり限られてしまった。しかし、地球は球形であるため、日本から観測できない期間も日本以外の国から観測することが可能である。そこで、インターネット上の世界中で撮影された中央経度 120~140° の画像を調べた。

5・6月		7月		8月		9月		10月	
日	時刻								
25(金)	23:04	1(日)	21:54	5(日)	18:38	11(火)	16:56	19(金)	16:54
26(土)	23:43	2(月)	22:31	6(月)	19:14	12(水)	17:34	20(土)	17:34
28(月)	0:22	3(火)	23:09	7(火)	19:51	13(木)	18:12	21(日)	18:13
29(火)	1:00	4(水)	23:46	8(水)	20:27	14(金)	18:50	22(月)	18:53
30(水)	1:39	6(金)	0:23	9(木)	21:04	15(土)	19:29	23(火)	19:33
31(木)	2:18	7(土)	1:00	10(金)	21:40	16(日)	20:07	24(水)	20:12
1(金)	2:56	8(日)	1:37	11(土)	22:17	17(月)	20:45	25(木)	20:52
2(土)	3:35	9(月)	2:14	12(日)	22:53	18(火)	21:24	26(金)	21:32
3(日)	4:13	10(火)	2:50	13(月)	22:30	19(水)	22:02	27(土)	21:12
4(月)	4:52	11(水)	3:27	15(水)	0:07	20(木)	22:41	28(日)	22:51
		12(木)	4:04	16(木)	0:43	21(金)	23:19	29(月)	23:31
		13(金)	4:41	17(金)	1:20	22(土)	23:58		
		14(土)	5:17	18(土)	1:57	24(月)	0:36		
				19(日)	2:34				

(図 14)2018 年の熊本における中央経度 130° で観測可能な日

(5) 調査したデータ

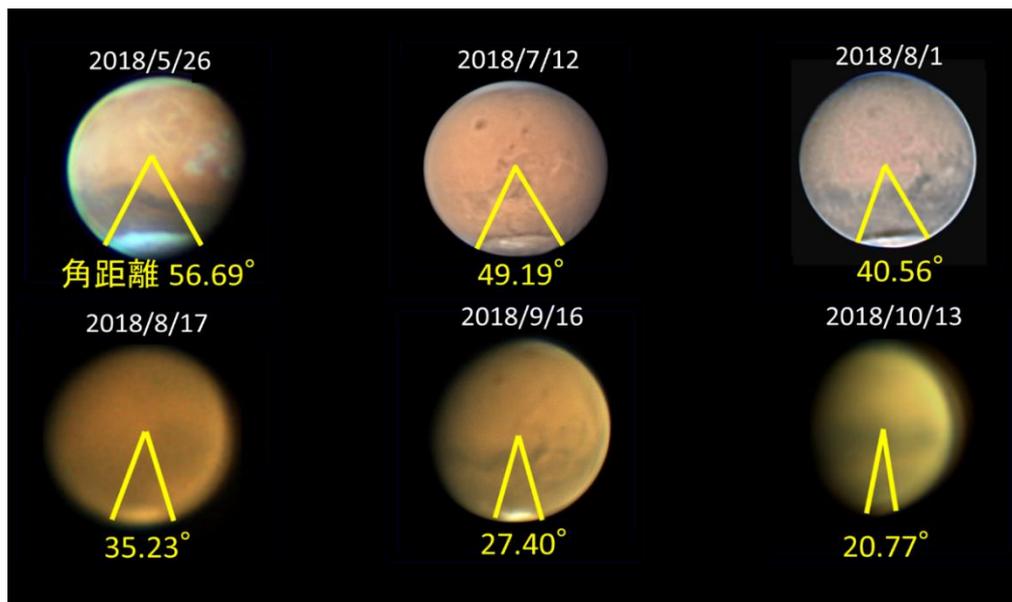
火星の1年を通しての極冠面積の変化を調べ、両極冠の消長及び原因を明らかにするために過去のデータを調べた。その結果、天体の撮像に CCD や CMOS カメラが使われて、(図15)に示すような精細な火星の画像が残っている2003年と2007~2008年、2013~2014年、2018~2019年の火星接近時の画像を得ることができた。

年	2003	2018~ 2019	2007~ 2008	2013~ 2014
極冠	南極冠		北極冠	
黄経(Ls)	186~316	227~345	340~63	81~210
中央経度	120~140		290~310	
画像数	106	65	33	52

(図15)2003~2019年の火星が地球に接近したときの極冠

(6)2018年の南極冠縮小

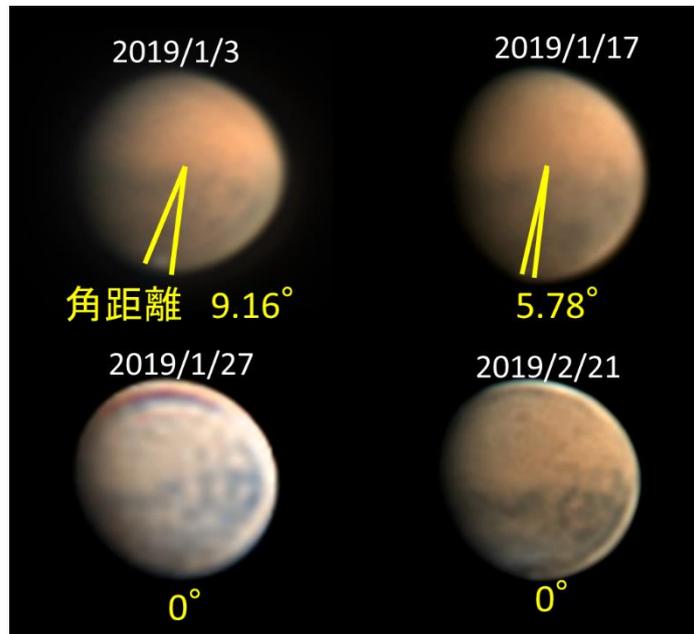
(図16)は2018年の南極冠を示しており、次第に縮小している。2018年8月17日と10月13日の画像は私たちが撮影したものである。



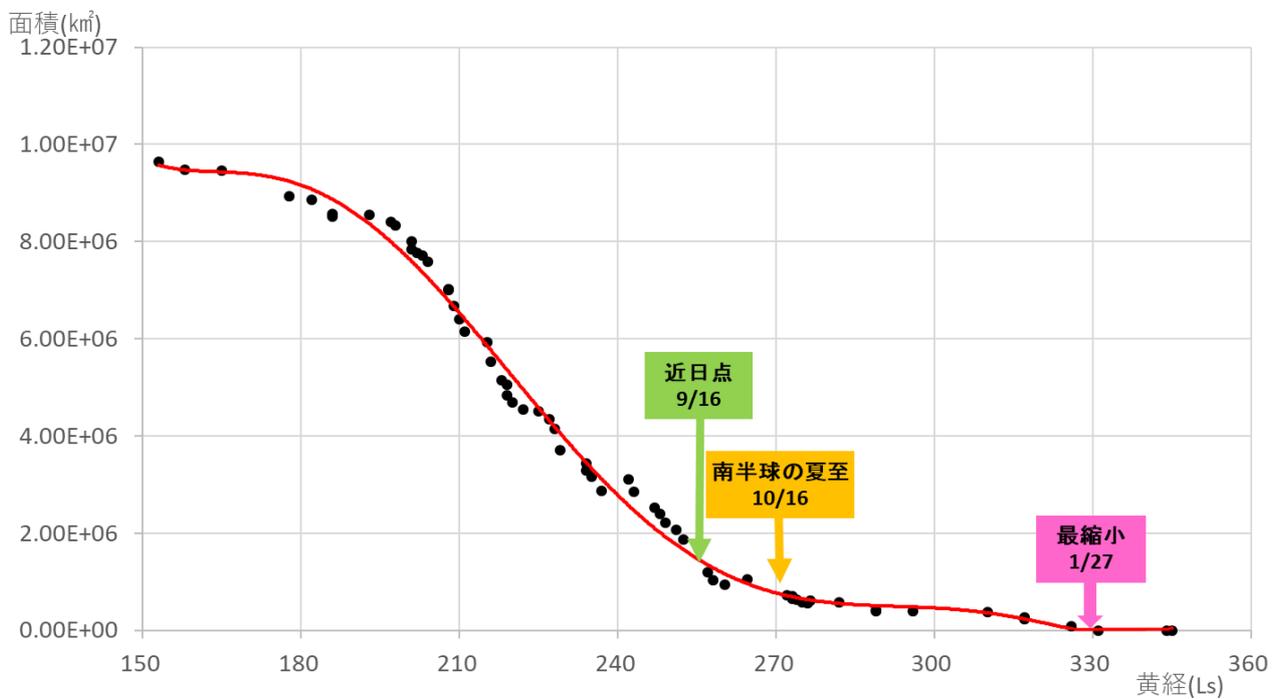
(図16)2018年の南極冠縮小

(7) 2018～2019 年の南極冠縮小

(図 17)に火星極冠の縮小を示す。(図 18)に黄経と南極冠面積の変動を示す。火星が近日点を通り過ぎた後も夏至に向けて南極冠が大きく縮小している。夏至以降も縮小速度は小さくなるが、南極冠は縮小を続け、2019年1月27日に確認することができなくなった。以降も南極冠は確認できず、最縮小を2019年1月27日とした。



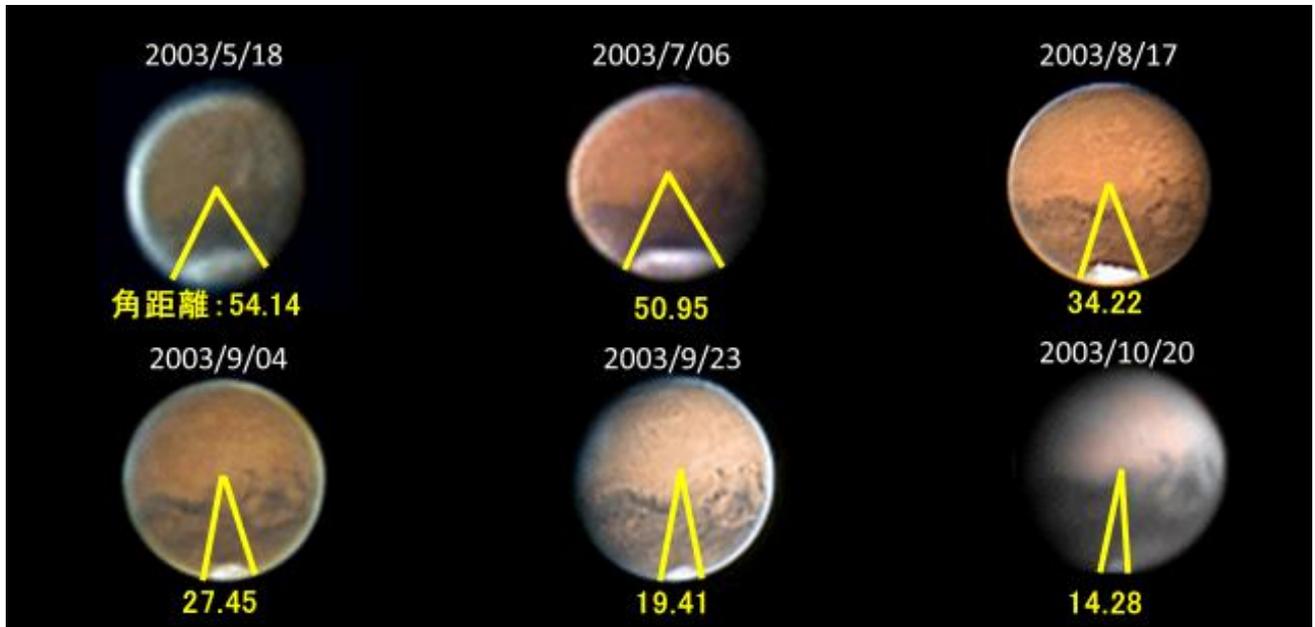
(図 17) 2018～2019 年の南極冠最縮小



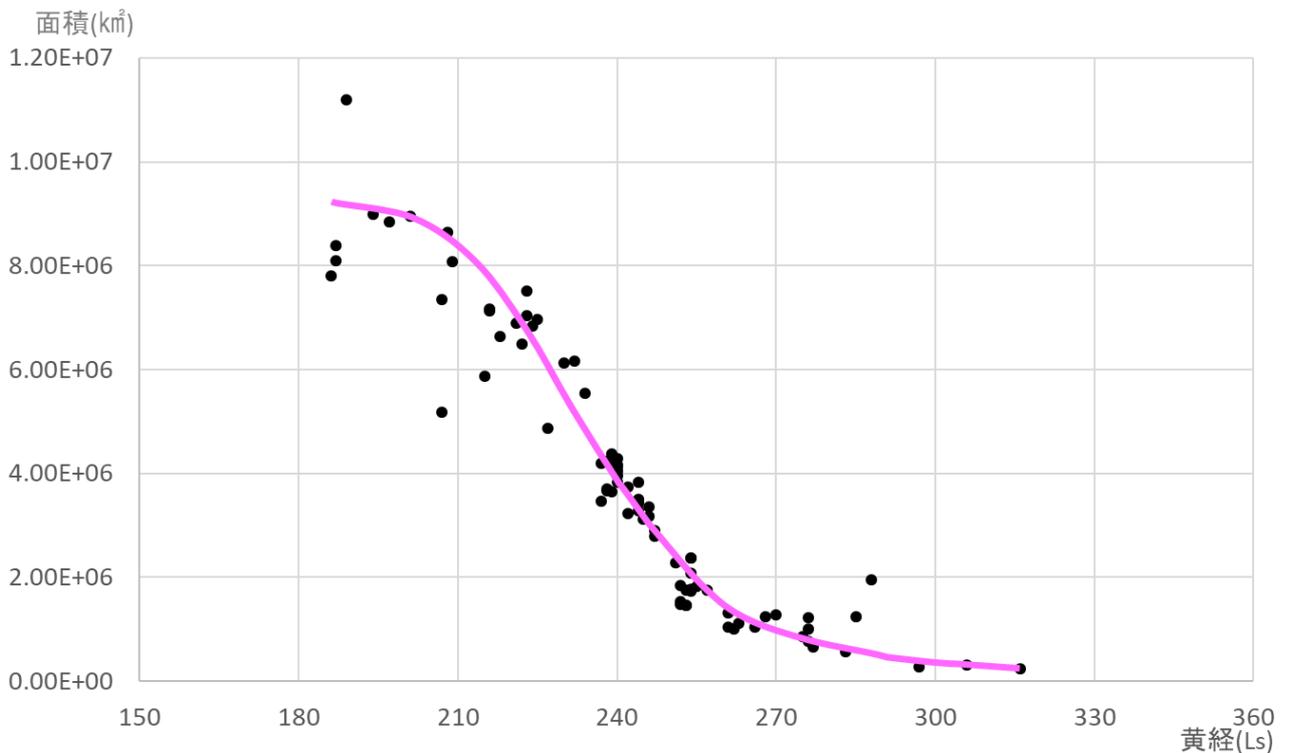
(図 18) 2018～2019 年の南極冠縮小

(8) 2003 年の南極冠縮小

(図 19) は 2003 年の南極冠を示し、次第に縮小している。(図 20) は 2003 年の南極冠面積の変動を表しており、 $L_s 210^\circ$  までは緩やかに縮小し、以降は縮小速度が速くなる。 $L_s 270^\circ$  からは緩やかに縮小している。



(図 19) 2003 年の南極冠縮小

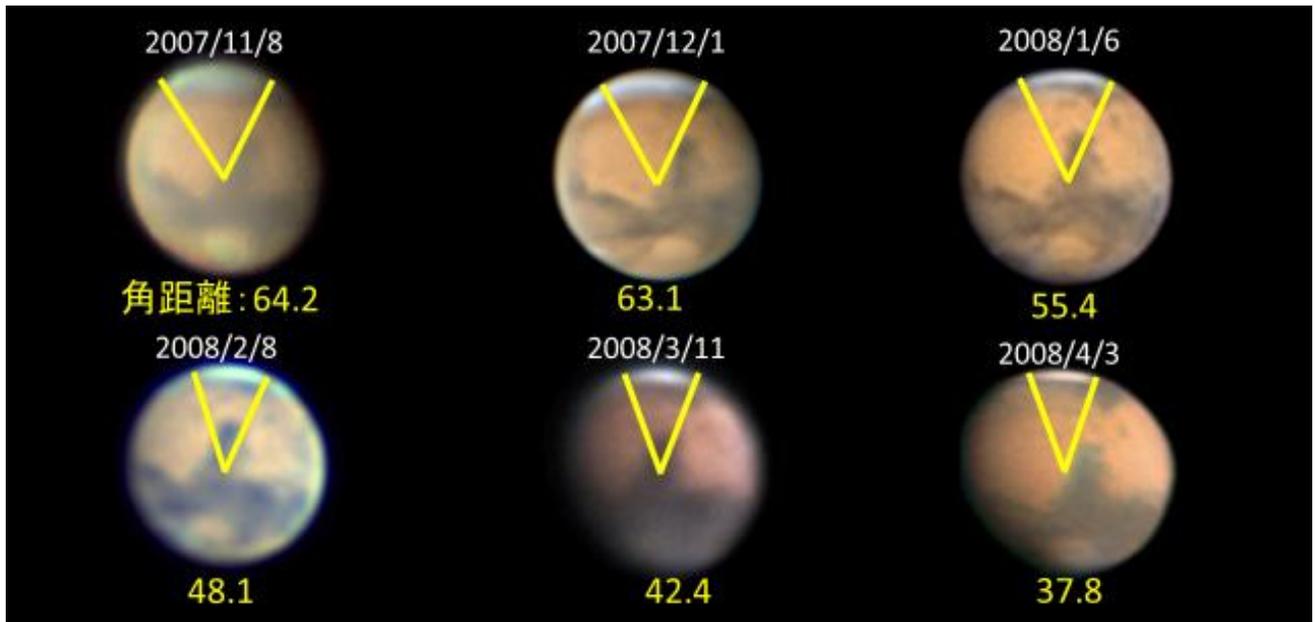


(図 20) 2003 年の南極冠縮小

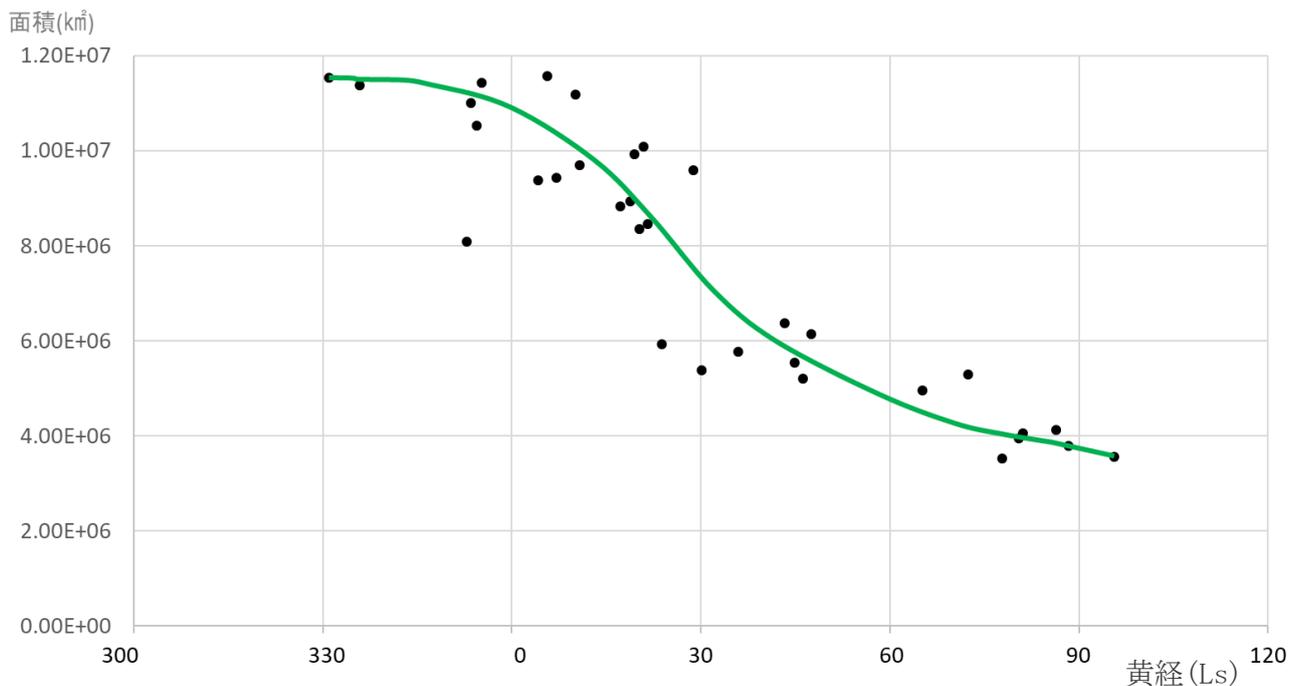
(9) 2007～2008 年の北極冠縮小

(図 21)は 2007～2008 年の北極冠を示しており、次第に縮小している。また、2007 年 12 月 1 日の画像で極冠の縁が広がって見えるのは、極地方に霧が発生しているためである。私たちが面積を測定した際は前後の霧が発生していない日の画像や火星シミュレーションソフト「火星くるくる」を参考に、極冠の大きさだけ測定した。

(図 22)は、2007～2008 年の北極冠面積の変動を表している。Ls0° までは緩やかに縮小し、それ以降は縮小速度が速くなっている。



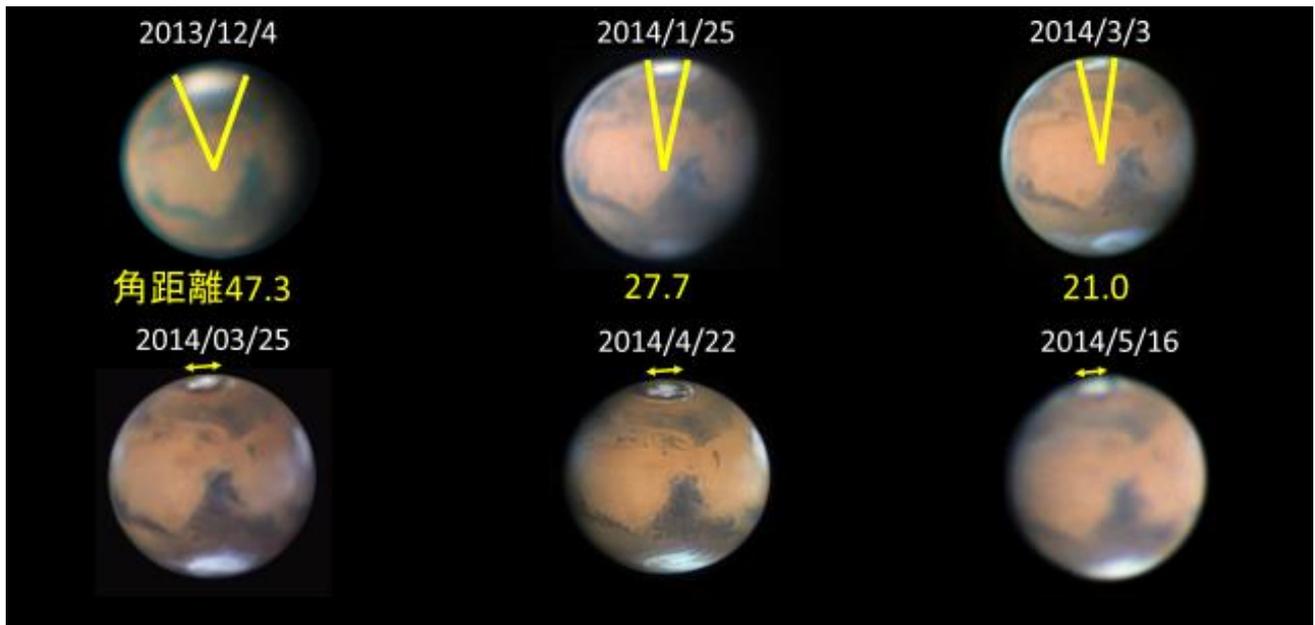
(図 21) 2007～2008 年の北極冠縮小



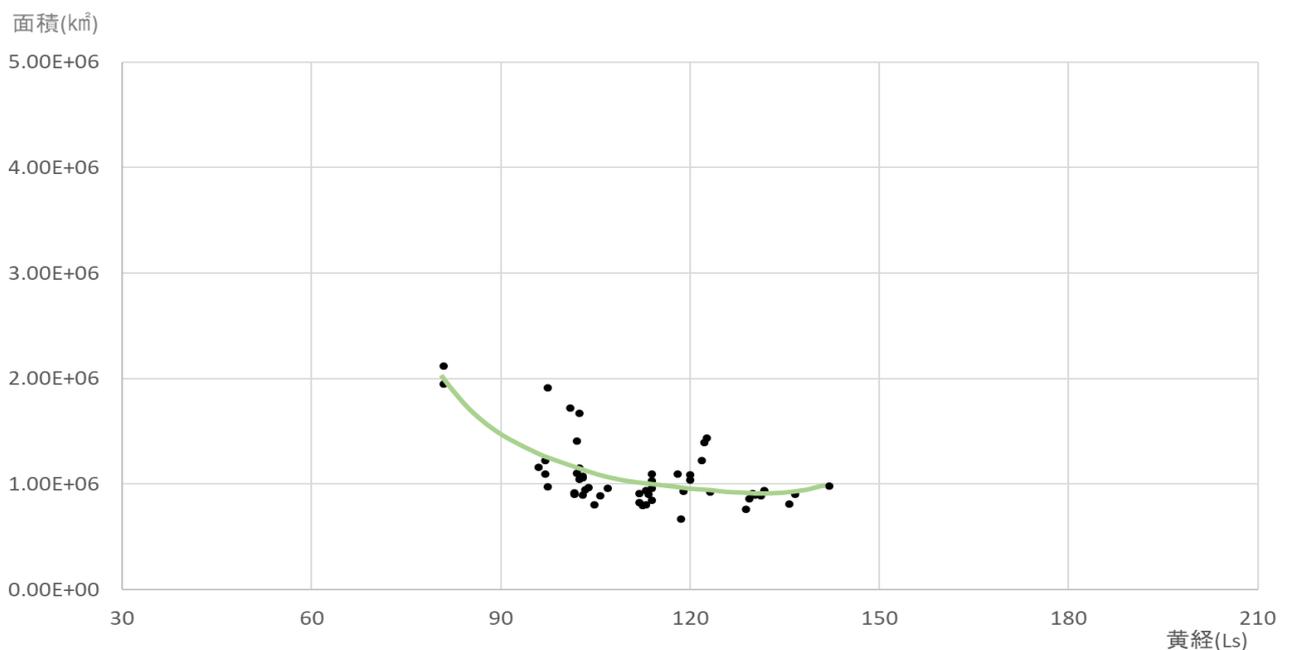
(図 22) 2007～2008 年の北極冠縮小

(10)2013～2014 年の北極冠縮小

(図 23)は 2013～2014 年の北極冠を示している。2014 年 1 月 25 日以降の画像では、北極冠と反対側に見かけ上南極冠が存在しているように見えるが、これは南極冠ではなく南半球に発生した霧である。この時期の地球から見える火星の中央緯度は $+19^\circ$  以上で、南極冠は地球の方を向いておらず、かつ太陽光は入射していない。そのため、南極冠は地球から観測できないと考える。また、2014 年 3 月～5 月の火星では、北極冠全体が見えている。このため、極冠の直径を角距離で測定するのではなく、極冠の長径を測定して、面積を求めた。(図 24)は、2013～2014 年の北極冠面積の変動を表している。Ls $100^\circ$  までは緩やかに縮小し、それ以降は目立った面積の変動は見られない。



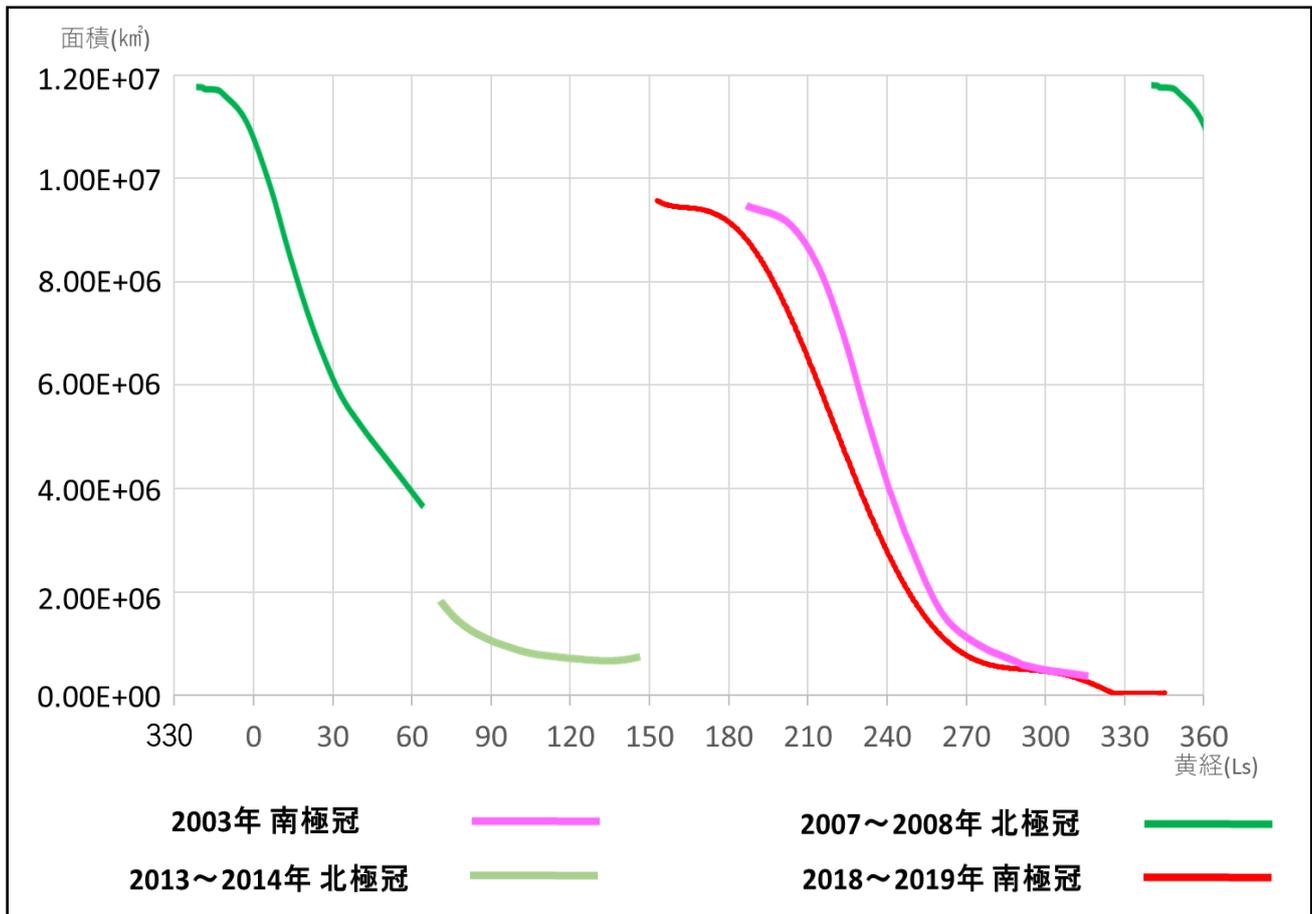
(図 23) 2013～2014 年の北極冠縮小と南半球に発生した霧



(図 24) 2013～2014 年の北極冠縮小

### (11) 火星極冠面積の変動

調査した 2003 年, 2007~2008 年, 2013~2014 年, 2018~2019 年の 4 回の火星極冠面積の変動を(図 25)に示す。Ls330~0° は Ls330~360° に対応している。南北両極冠とも縮小する様子が調べられた。極冠の最増大は極に太陽光が入射しない冬で、火星の内側を公転する地球からは観測することができない。極冠が増大する様子や地球から観測できない期間の極冠を含めた、火星の 1 年間を通じた極冠消長を、極が受ける太陽放射エネルギー量や火星大気圧の変動をもとに考察する。

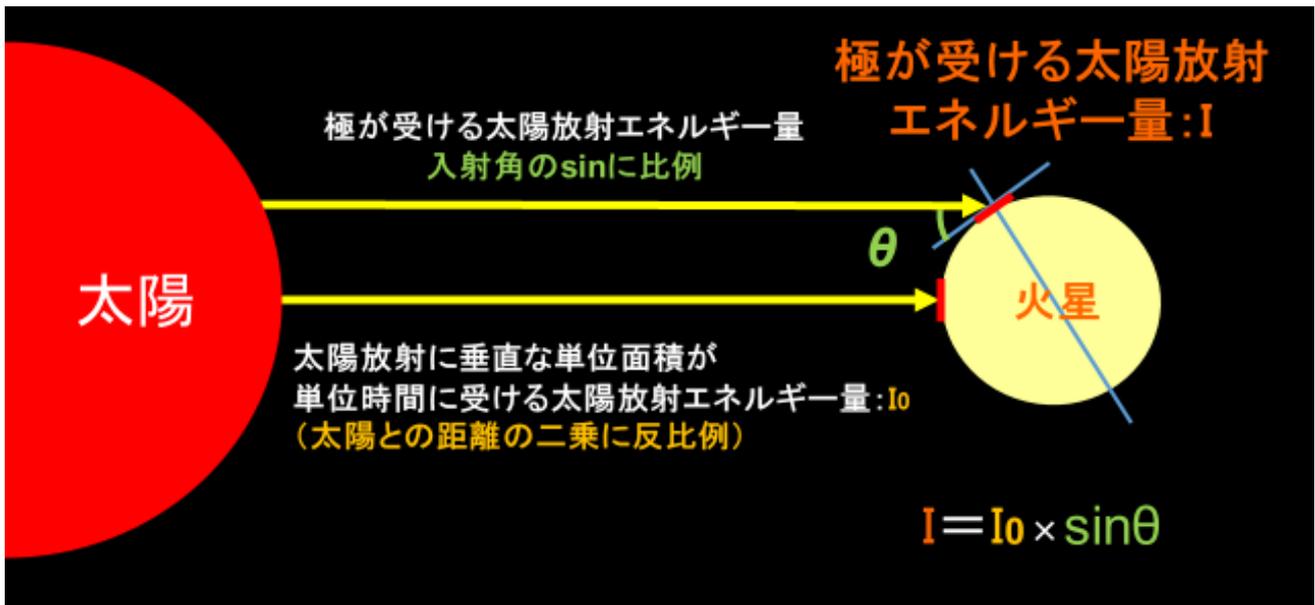


(図 25) 火星極冠面積の変動

## 5. 考察

### (1) 火星極冠の縮小の原因

極冠縮小の主な原因は、極冠に入射する太陽放射エネルギーである。極で受ける太陽放射エネルギー量について(図 26)に示す。太陽放射エネルギーは太陽と火星との距離、及び太陽放射の極に対する入射角(太陽高度)に影響する。火星表面で太陽放射に垂直な単位面積が単位時間に受ける太陽放射エネルギー量  $I_0$  は、火星と太陽の距離の 2 乗に反比例する。火星の表面に入る太陽高度が  $\theta$  の時、その地点が受ける太陽放射エネルギー量は  $\sin$  に比例する。このことから、太陽高度を  $\theta$  としたとき、極が受ける太陽放射エネルギー量  $I$  は  $I_0 \times \sin \theta$  となる。



(図 26) 極が受ける太陽放射エネルギー量

### (2) 極が受ける太陽放射エネルギー量の違い

南極が受ける太陽放射エネルギー量を(図 27)に示す。近日点で日心距離は 1.38AU、太陽光の入射角は  $23.9^\circ$ 、太陽放射エネルギー量は 0.212 となる。火星の南半球が夏至のとき、日心距離は 1.39AU、太陽光の入射角は  $25.2^\circ$ 、太陽放射エネルギー量は 0.221 となる。北極が受ける太陽放射エネルギー量を(図 28)に示す。遠日点で日心距離は 1.67AU、太陽光の入射角は  $23.9^\circ$ 、太陽放射エネルギー量は 0.146 となる。火星の北半球が夏至のとき、日心距離は 1.66AU、太陽の入射角は  $25.2^\circ$ 、太陽放射エネルギー量は 0.155 となる。

近日点を通過するときより、南半球の夏至で南極に入射する太陽光の入射角が大きいため、南極冠が受ける太陽放射エネルギー量は大きくなる。同様に遠日点を通過するときより、北半球の夏至で北極冠が受ける太陽放射エネルギー量は大きくなる。

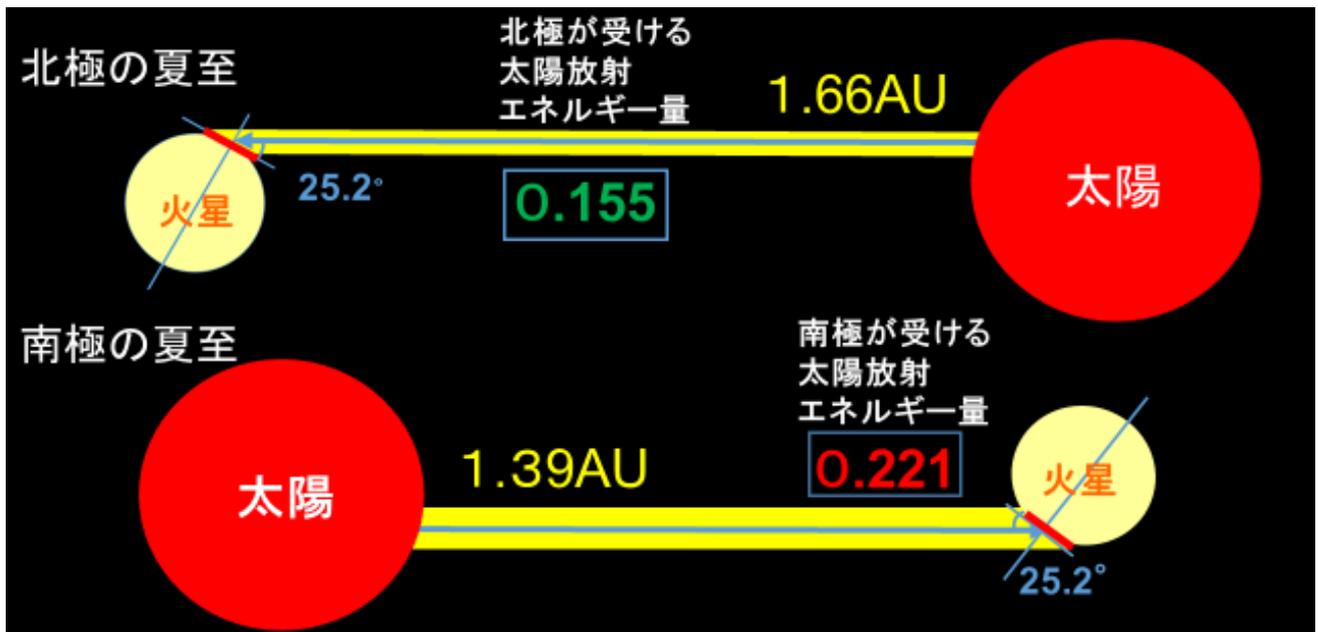
また、(図 29)に示す通り、極に当たる太陽光の入射角は両極とも  $25.2^\circ$  で同じである。しかし、南北半球それぞれの夏至を比べたとき、南半球が夏至のときの方が太陽との距離が近い。そのため南半球が夏至のときに南極が受ける太陽放射エネルギー量の方が大きい。

火星の南半球	黄経(Ls)	日心距離(AU)	入射角	太陽放射エネルギー量
春分	180	1.47	0.0	0.000
近日点通過	251	1.38	23.9	0.212
夏至	270	1.39	25.2	0.221
秋分	360	1.56	0.0	0.000

(図 27) 南極が受ける太陽放射エネルギー量

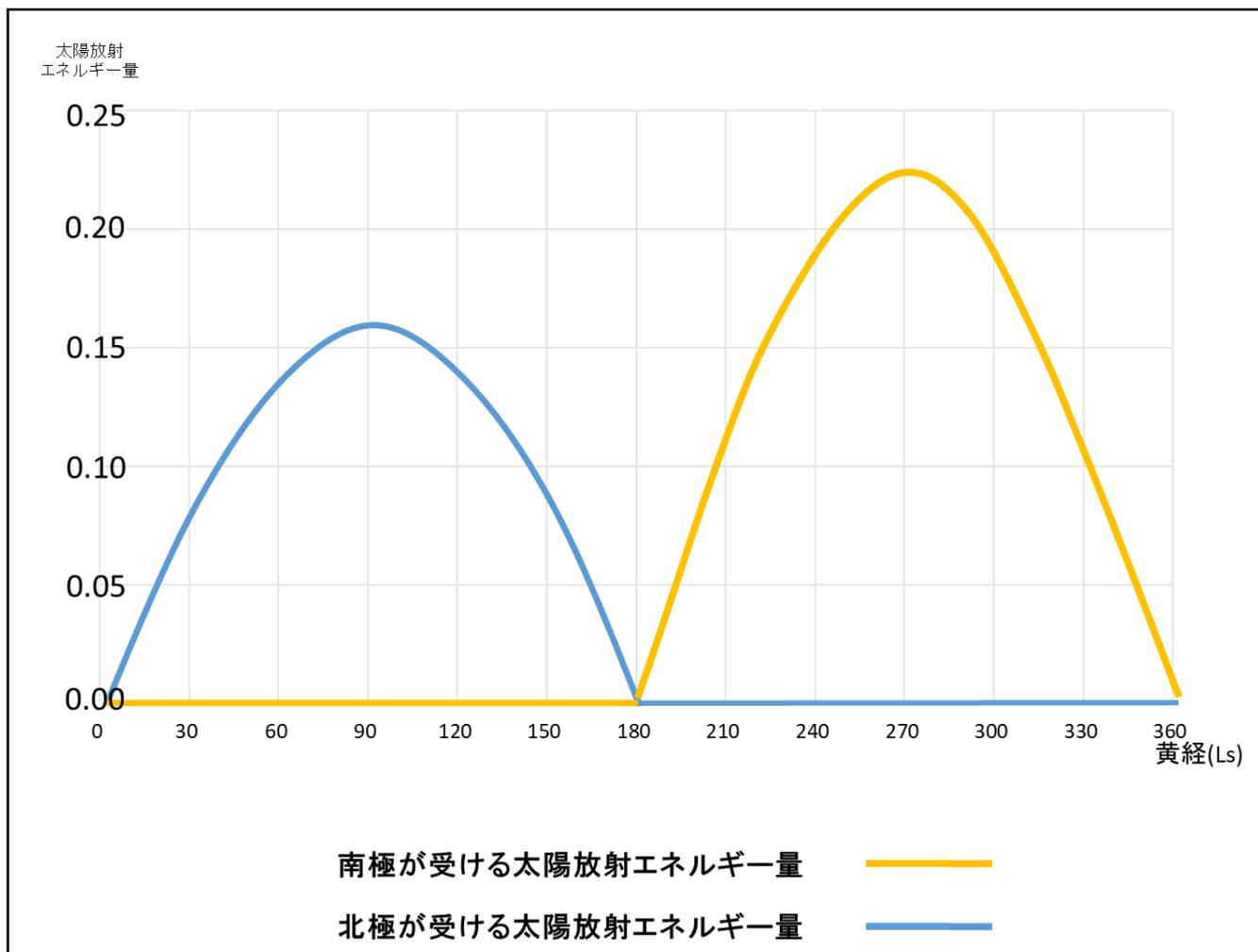
火星の北半球	黄経(Ls)	日心距離(AU)	入射角	太陽放射エネルギー量
春分	360	1.56	0.0	0.000
遠日点通過	71	1.67	23.9	0.146
夏至	90	1.66	25.2	0.155
秋分	180	1.47	0.0	0.000

(図 28) 北極が受ける太陽放射エネルギー量



(図 29) 極が受ける太陽放射エネルギー量(地球を 1 とする)の違い

(図 30)は地球の赤道が受けるエネルギー量を 1 として、火星の極が受ける太陽放射エネルギー量の変動を示したものである。極への太陽放射入射角が  $0^\circ$  となる秋分から冬至、春分までは、極が受ける太陽放射エネルギー量は 0 である。

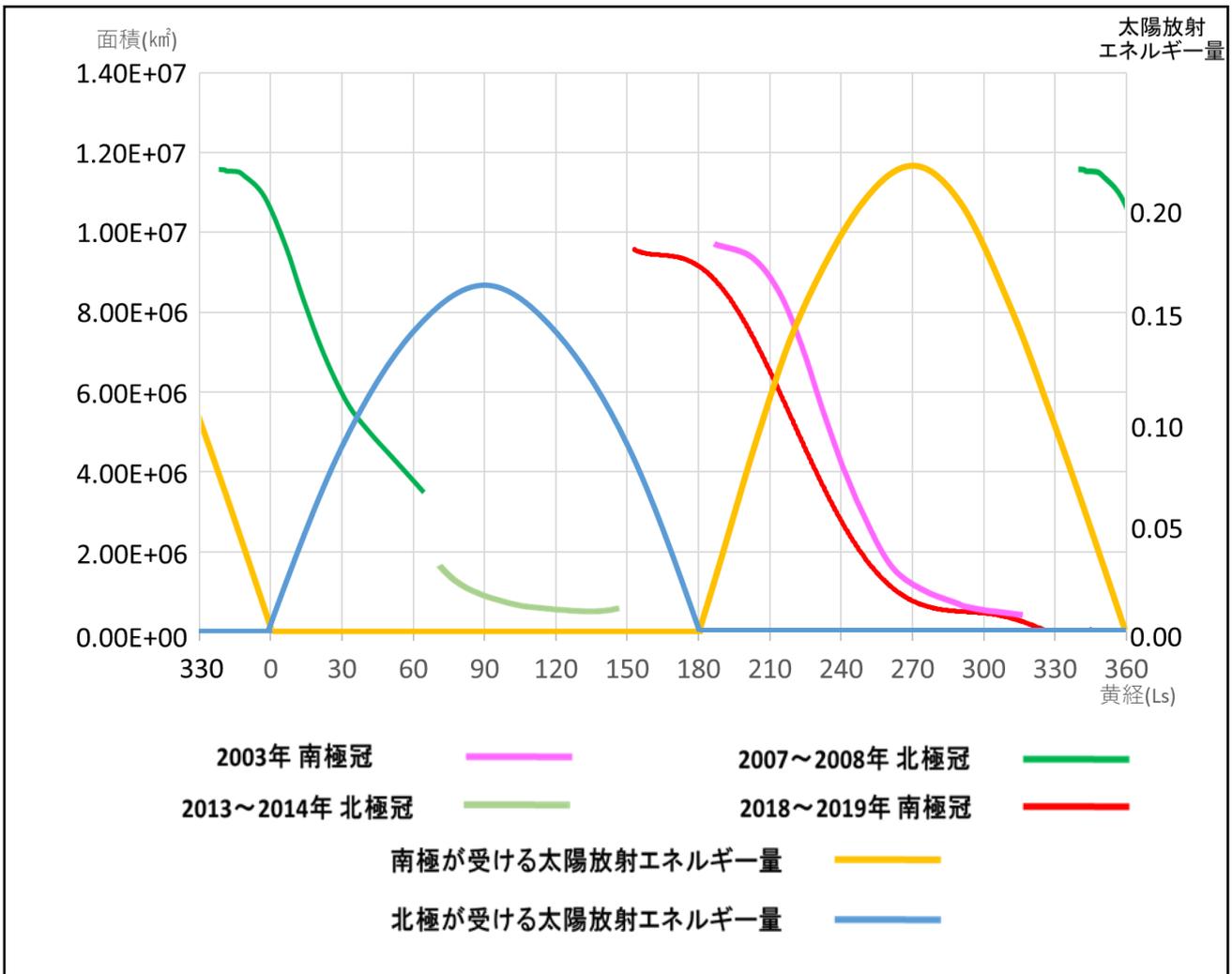


(図 30)極が受ける太陽放射エネルギー量(地球を 1 とする)の変動

### (3) 極冠面積と太陽放射エネルギー量の関係

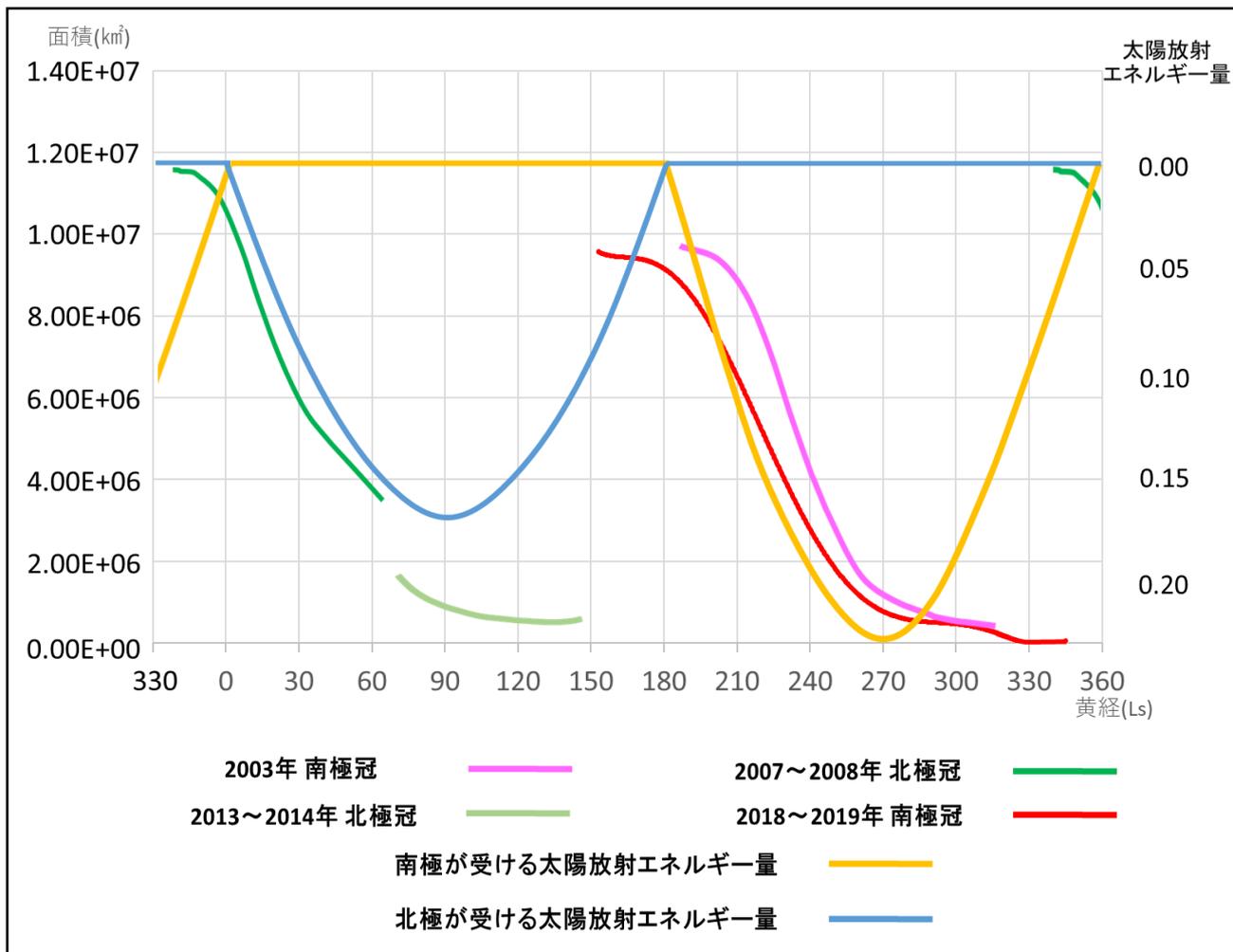
両極が受ける太陽放射エネルギー量と、両極冠面積の変動を重ねて(図 31)に示す。北極に太陽放射が入射し始める  $Ls 0^\circ$  の北半球の春分以降、北極が受ける太陽放射エネルギー量は次第に大きくなり、最大となる  $Ls 90^\circ$  の北半球の夏至にかけて北極冠面積が縮小していく。同様に、南極に太陽放射が入射し始める  $Ls 180^\circ$  の南半球の春分以降、南極が受ける太陽放射エネルギー量は次第に大きくなり、最大となる  $Ls 270^\circ$  の南極の夏至にかけて南極冠面積が縮小していく。両極冠とも最縮小するのは、極が受ける太陽放射エネルギー量が最大の時よりも  $Ls$  で約  $60^\circ$  遅れる。

$Ls$  が  $60^\circ$  変化する時間は、地球暦に換算すると約 114 日に相当する。地球でも太陽放射が地球表面を暖めた後、大気を暖めるまでに時間がかかるため、夏至ではなく夏至を過ぎた 1、2 ヶ月過ぎたときに最も暑くなる。極冠の最縮小が夏至より遅れるのも地球と同様に、太陽放射が火星の表面を暖めた後、大気を暖めるまでに時間がかかるからではないかと考える。また、火星大気圧は地球大気圧の 1% 以下である。このことも太陽放射が大気を暖めるのに時間がかかる原因となっていると考える。



(図 31) 両極冠面積と太陽放射エネルギー量

(図 32)に太陽放射エネルギー量の大小を反転させて極冠面積の変動と重ね合わせて示す。北極が受ける太陽放射エネルギー量増加と北極冠面積減少、南極が受ける太陽放射エネルギー量増加と南極冠面積減少がそれぞれ調和する。しかし、2013～2014 年の北極冠面積は北極が受ける太陽放射エネルギー量と調和しない。これは、地球の年による気候変動と同様で、この年の火星の北半球が暑夏であったと考える。

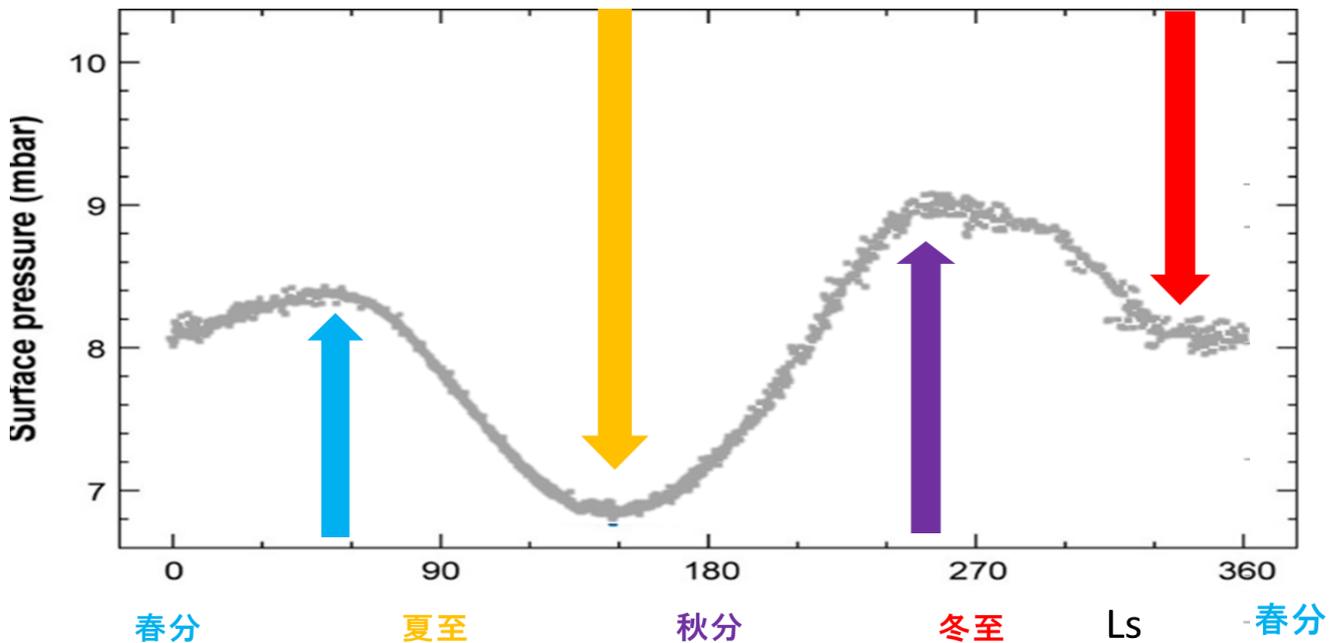


(図 32) 火星極冠の消長と反転させた太陽放射エネルギー量の変動

#### (4) 火星大気圧の変動

(図 33)は 1976 年に火星に着陸したバイキング 1 号の探査結果をもとに、火星の 1 年を通しての地表面気圧の変動を示したものである。極冠面積が大きくなる時、大気の主成分である CO<sub>2</sub> はドライアイスに昇華して極冠に固定される。大気中の CO<sub>2</sub> 量は減少するため、火星大気圧は低くなる。逆に、極冠面積が小さくなる時、極冠のドライアイスが CO<sub>2</sub> に昇華して大気中の CO<sub>2</sub> 量が増加し、火星大気圧は高くなる。このように、火星の両極冠のドライアイスは、火星大気のリザーバータンクとなっている。

(図 33)をみると、春分から遅れた Ls60° 付近で大気圧が少し高くなり、夏至から遅れた Ls150° 付近で 1 年間の中で最も大気圧が低くなっている。また、秋分から遅れた Ls240° 付近で 1 年間の中で最も大気圧が高くなり、冬至から遅れた Ls360° 付近で大気圧が少し低くなっている。これらは全て、Ls で約 60° 遅れている。火星極冠の最縮小も夏至から Ls で約 60° 遅れていることから、火星大気圧の変動は両極冠の面積の縮小と関係していることが分かる。Ls150° の火星大気圧の極小時は、両極冠の合計面積が最大となっており、Ls240° 付近の火星大気圧の極大時は、両極冠の合計面積が最少になっていると考える。



(図 33)火星大気圧の変動

Smith MD. 2008.

Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 36:191-219

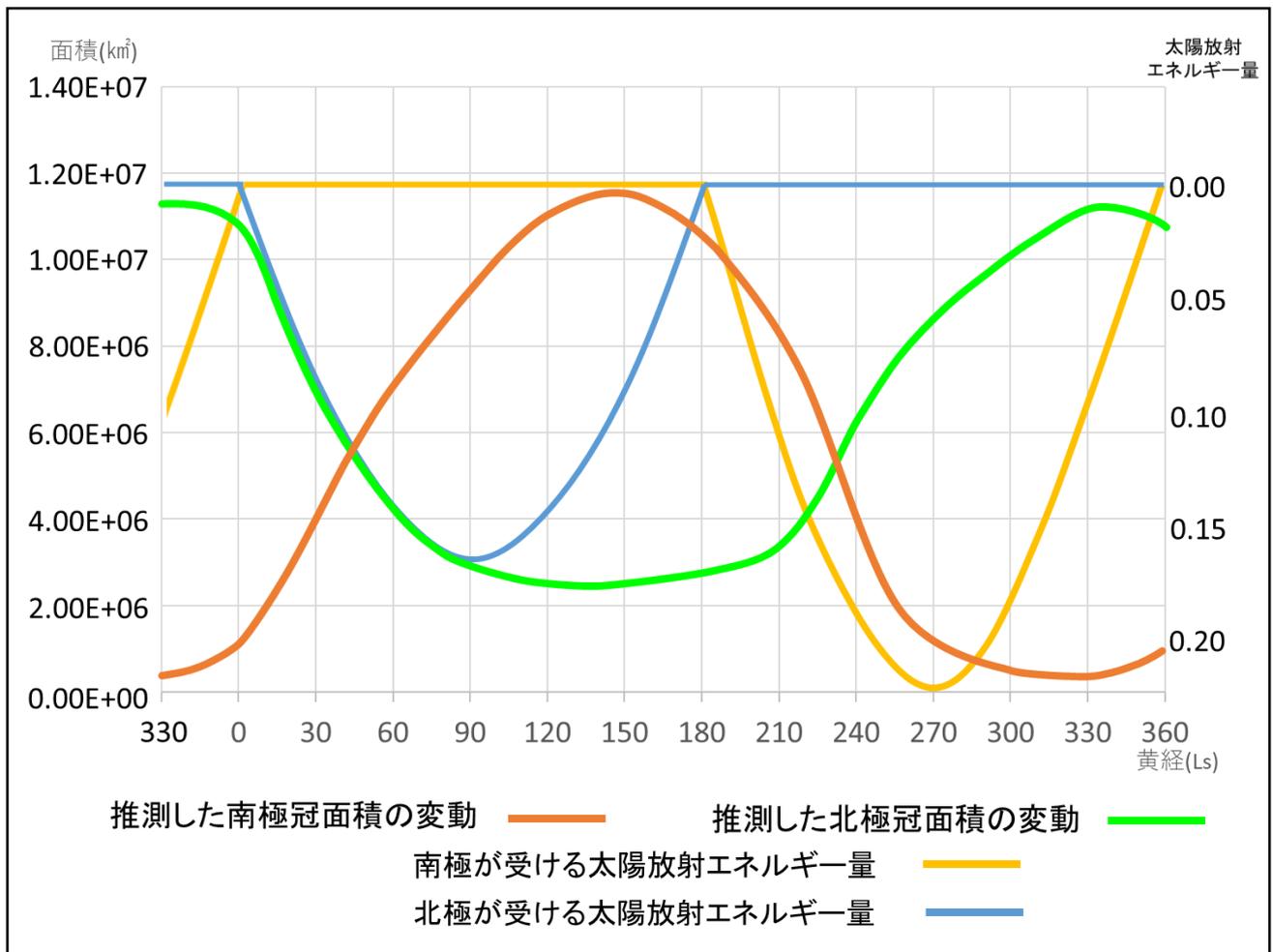
#### (5) 火星の 1 年を通した火星極冠の消長

極冠が増大する様子や、太陽放射が入射しない火星の冬の期間の極冠面積変動は不明である。(図 34)に火星の 1 年を通した火星極冠の面積変化を、極が受ける太陽放射エネルギー量と火星大気圧の変動から推測して示す。

南極冠は南極が太陽放射を受けない冬に最大となり、北極冠も同様である。極冠に太陽放射が入射するようになり、極冠が受ける太陽放射エネルギー量が次第に大きくなるにつれて極冠は縮小していく。南極冠の最縮小は夏至よりも Ls で約  $60^\circ$  遅れる。南半球の夏至は近日点に近く、南極冠が受ける太陽放射エネルギー量は北極冠より大きい。南極冠は大きく縮小し、2019 年のように地球から確認できないこともあると考える。北半球の夏至は遠日点に近く、北極冠が受ける太陽放射エネルギー量は南極冠より小さい。北極冠の最縮小面積は北極が受ける太陽放射エネルギー量に応じて、南極冠ほど小さくないと考える。

夏至を過ぎて、極に入射する太陽放射エネルギーが減少すると、極冠は増大するはずである。しかし、極が受ける太陽放射エネルギー量が減少していく頃は、他方の極は全く太陽放射が入射しない時期で、極冠は増大している。極に入射する太陽放射エネルギーが減少していく時に極冠が増大しないのは、他方の極冠がすでに大きく成長しているため、増大できないからだと考える。これは両極冠面積と大気を合わせた CO<sub>2</sub> 量が一定であるため、一方の極冠が大きいときはもう一方の極冠が増大できるほどの CO<sub>2</sub> がないためだと考えられる。

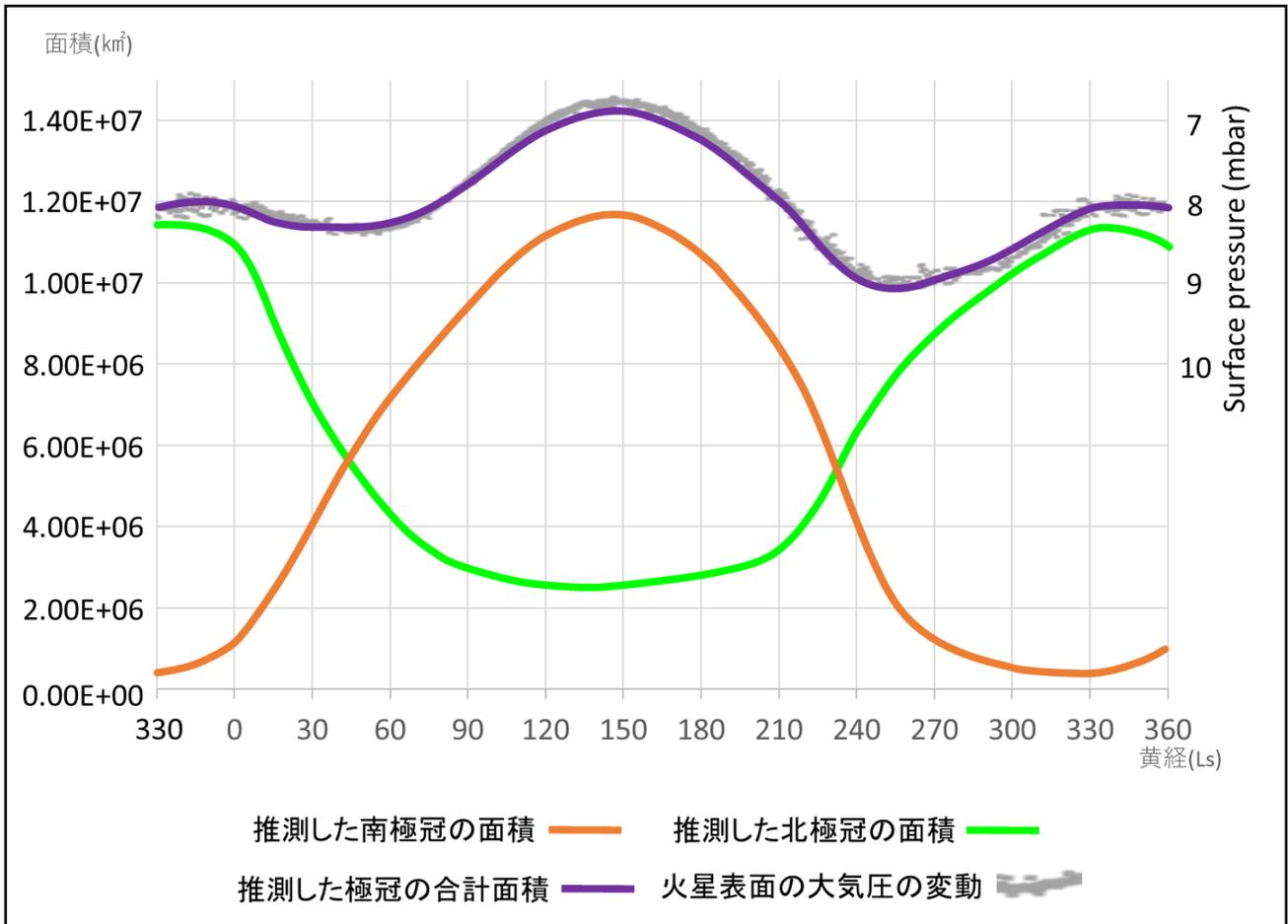
極冠面積は、極が受ける太陽放射エネルギー量に反比例するように変化する。極は春分から夏至を挟んで秋分まで太陽放射を受けるが、秋分から冬至を挟んで春分までは太陽放射を受けない。また、火星の 1 年を通しての南極が受ける太陽放射エネルギーは北極より大きく、南極冠は北極冠より大きく縮小する。



(図 34) 火星の 1 年間を通して推測した火星両極冠の消長と  
両極が受ける太陽放射エネルギー量

(6) 火星極冠の消長と大気圧の変動との関係

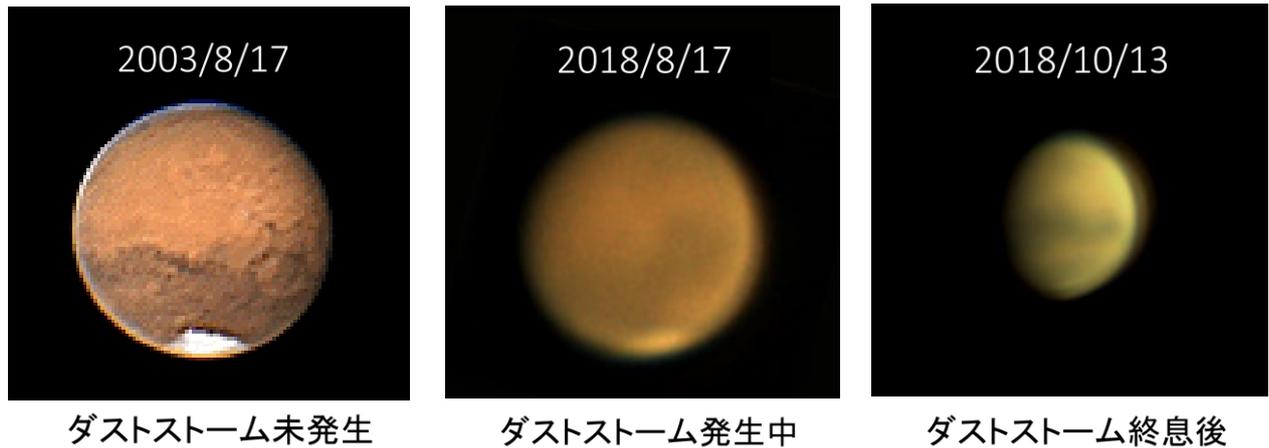
(図 35)に推測した極冠の面積変化と、両極冠を合計した面積、大気圧の大小を反転させた火星大気圧を重ねて示す。極冠が縮小するとドライアイスが昇華して大気圧は増大し、極冠が増大すると大気中のCO<sub>2</sub>が昇華して大気圧は下がる。火星大気圧を反転させた変動と、両極冠面積の変動が調和する。このことから、両極冠の消長は、極が受ける太陽放射エネルギー量や火星大気圧の変化から逆算して求められると考える。



(図 35) 推測した火星極冠の消長と両極冠の合計面積、大小を反転させた大気圧の変動

### (7) ダストストームの発生と極冠の消長への影響

(図 36)の 2018 年の火星は私たちが撮影した画像である。2018 年 5 月末に大規模なダストストームが発生した。ダストストームとは、火星表面の塵や砂などが巻き上がる気象現象である。2018 年 8 月 17 日の方が火星と地球との距離が近く、火星の表面の様子が精細に見えるはずである。しかし、8 月 17 日の火星にはダストストームが発生しているため、表面の模様や極冠が不明瞭である。10 月になると火星と地球の距離は遠くなるがダストストームが終息して、表面の模様が明瞭になっている。



(図 36) ダストストームの発生

(図 25)を見ると地球と同様に年度によって極冠の消長の様子に違いがある。南極冠の縮小曲線に着目すると、2003 年より 2018~2019 年の縮小速度が速くなっている。また、最縮小時は南極冠が観測できないほど小さくなっている。これはダストストームの影響が考えられる。ダストストームが火星全体を覆い、太陽放射を吸収して火星の大気を暖めたために南極冠の縮小が促進されたと考えられる。

地球では大規模な火山活動等で大量の粉塵が大気に放出されると、太陽放射を遮り寒冷化する。しかし、火星では大規模なダストストームにより、南極冠の縮小が促進された。これは、大気中のダストが太陽放射によって暖められ、火星を温暖化させていると考える。

## 6. 結論

### (1) まとめ

- 火星極冠は、極に入射する太陽放射エネルギー量に比例して縮小する。
- 北極冠が1年間で受け取る太陽放射エネルギー量は、南極冠より小さいため完全には消失せず、最大面積は南極冠よりも大きい。
- 南極冠が1年間で受け取る太陽放射エネルギー量は、北極冠より大きいため、南極冠はほぼ消失するまで縮小する。
- 火星極冠の縮小は極が受ける太陽放射エネルギーの変動から Ls で約  $60^\circ$ （地球暦で約 114 日）遅れる。原因は太陽放射エネルギー量を受けて火星表面や大気が暖まるまでに時間がかかるためである。また、火星大気圧が低いことも原因と考える。
- 2013～2014 年の北極冠面積は北極が受けるエネルギー量と調和しない。これは、地球の年による気候変動と同様で、この年の火星北半球が暑夏であったと考えられる。火星は地球の気候変動と同様に、暑夏や冷夏等の年変動がある。
- 火星大気圧の1年間の変動は、春分から遅れた Ls $60^\circ$  付近で大気圧が少し高くなり、夏至から遅れた Ls $150^\circ$  付近で最も大気圧が低くなっている。また、秋分から遅れた Ls $240^\circ$  付近で最も大気圧が高くなり、冬至から遅れた Ls $360^\circ$  付近で大気圧が少し低くなっている。これらは全て Ls で約  $60^\circ$  遅れている。火星極冠の最縮小も夏至から Ls で約  $60^\circ$  遅れていることから、火星大気圧の変動は両極冠の面積の縮小と関係し、大気圧が最も高いときは両極冠合計の面積が最少で、大気圧が最も低いときは両極冠合計の面積が最大となる。
- 研究の結果から得られた南北極冠面積の変動と、両極が受ける太陽放射エネルギー量、火星大気圧の変動から、地球から観測できない期間を含めた、火星の1年間の極冠面積の変動が推測できる。火星大気圧の大小を反転させた変動と推測した両極冠面積の変動が調和する。極が受ける太陽放射エネルギー量が増加すると極冠が縮小し、ドライアイスが昇華して大気圧が増大する。極に入射する太陽放射エネルギー量が減少しても、直ぐには極冠は増大しない。この時、他方の極冠はすでに増大しており、片方の極冠が縮小して大気圧が増加しないと、大気中の CO<sub>2</sub> 昇華による固定化は起こらず、極冠は増大できない。火星の大気と極冠を含めた CO<sub>2</sub> 量は、両極冠が共に増大できるほど多くない。
- 2018 年のダストストーム発生時の南極冠縮小は、未発生時より速くなり、ダストストームは極冠の縮小を促進させている。大気中のダストは、太陽放射を吸収して大気を暖め、温暖化させて南極冠の縮小を促進させた。

地球以外の地球型惑星の気候や太陽放射エネルギー等の関係を調べ、気候変動を明らかにすることは、地球の気候や気候変動の解明にもつながる。今回の研究手法は太陽系外の地球型惑星の気候解明にも活かされるだろう。

## (2) 課題

2018年8月から撮影した火星の画像は、画像処理を行っても精細にならなかった。これは、同年5月に火星で発生した大規模なダストストームの影響である。私たちが撮影した画像だけで研究ができればよかったが、観測初期には技術不足のため撮影した画像は南極冠や火星の模様がはっきりしていなかった。私たちが使っている天体望遠鏡は口径20cmで、インターネット上に掲載されている精細な火星の画像は、ほとんどが口径30cm以上の望遠鏡によるものである。私たちの望遠鏡の分解能が低いことも、精細な画像が撮影できなかった原因と考えている。

火星極冠の面積を精密に調べるには、中央経度を揃えた観測が必要であると考えられる。1つの団体や個人で中央経度を揃えた観測により、火星の1年間を通じた極冠の精密な消長を明らかにすることは非常に困難である。そのため、世界中からデータを集める必要がある。しかし、観測条件を揃えてデータを収集することも必要であり、より良い観測方法を検討する必要がある。

火星探査機バイキングによる火星の1年間の大気圧変化は、火星に着陸した1976年から測定されたものである。私たちが調査した両極冠の面積変動とは異なる期間である。また、火星の1年間の大気圧が、バイキングの測定結果と毎年同じ変動を示すとは限らないと考える。火星の1年間の大気圧は、地球で起こる暑夏や冷夏、暖冬や厳冬のような年による気候変動により極冠の消長が変化することで、毎年同じ変動を示さないのではないかと考える。今後、火星に着陸した探査機による1年間の大気圧変動の測定と、火星を周回する探査機等による地球から見えない側を含めた極冠消長の観測とが毎年継続されることで、火星の気候や気候変動が詳しく解明されると考える。

## 7. 参考文献と使用ソフト

- ・東亜天文学会  
[https://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/~cmo/cmo/oaa\\_mars.html](https://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/~cmo/cmo/oaa_mars.html)
- ・月惑星研究会  
[alpo-j.asahikawa-med.ac.jp/](http://alpo-j.asahikawa-med.ac.jp/)
- ・アストロアーツ  
[www.astroarts.co.jp](http://www.astroarts.co.jp)
- ・黒田剛史ホームページ  
<http://kuroda.dramatic.planets.com/research.html>
- ・Fire Capture
- ・Autostackert!2
- ・RegiStax6
- ・GIMP2.10
- ・ステラナビゲーター
- ・火星くるくる
- ・WinJUPOS

## 8. 謝辞

熊本県民天文台の中島 尚 副台長には、火星の撮像や画像処理について御指導いただきました。また、熊本大学大学院の吉朝 朗 教授には研究のまとめ方について御指導いただきました。厚くお礼申し上げます。研究や夜間観測に御支援いただいた、顧問の湊先生にお礼申し上げます。終夜の夜間観測に理解と協力してもらった家族に感謝します。