

月の宇宙天気予報

亘 慎一(情報通信研究機構)

1. はじめに

1969年7月にアポロ11号が月の「静かの海」に着陸し、1972年12月のアポロ17号まで合計6回の有人探査が行われた。その後は、しばらくの間、月への関心は薄れていたが、表1に示すように、ここ数年、月探査への関心が強まりつつある(加藤、川口、2006)。また、将来的には有人探査も考えられている。有人探査を行う場合、重要となるのが宇宙環境による影響であり、月の宇宙天気予報について検討を行った。

表1. 各国の月探査計画

年	探査機名(国名)
2007年	セレーネ(日本)
2007年	チャンア1(中国)
2007-2008年	チャンドラヤーン1(インド)
2008年10月	ルナー・リコネサンス・オービター(米国)
2012年	ルナグローブ(ロシア)
2010年ころ	チャンア2(中国) ローバーによる無人月面探査
2012年ころ	チャンア3(中国) 月面のサンプルリターン
2018年以降	有人月面探査(米国)

2. NICTの宇宙天気予報について

国際連合の傘下の機関の下部機関として国際宇宙環境情報サービス(ISES、International Space Environment Service)と呼ばれる宇宙天気のための国際的な組織があり、現在、米国、カナダ、日本、オーストラリア、中国、インド、ロシア、ポーランド、チェコ、スウェーデン、ベルギーの11カ国が加盟して活動を行っている。NICTは日本の宇宙天気予報センターを運営しており、太陽フレア、地磁気擾乱、高エネルギー粒子に関する24時間の予報を毎日1回午後3時(日本時間)に発令している。また、宇宙天気に関する日報、週報(金曜日)を定期的に配信するほか、大きな現象が発生した場合には臨時情報を配信している。図1に宇宙天気情報の提供を行っているホームページ(<http://swc.nict.go.jp/>)を示す(亘、2006)。



図1. Web による宇宙天気情報の提供 (http://swc.nict.go.jp/)

近年のスパムメールの増加は、メールによる迅速な宇宙天気情報配信の障害になりつつある。そこで、NICTではメールによる宇宙天気情報の配信に加え、RSSによる情報配信を始めた。宇宙天気情報に関する日報、週報、臨時情報のほか、米国の気象衛星 GOESで観測されているX線、高エネルギープロトン、高エネルギー電子のフラックスレベル及びNASAのACE衛星の太陽風観測データを入力としたニューラルネットワークによる地磁気予測(渡辺、大高、1998)を利用した各種の警報情報の配信を行っている(図2)。

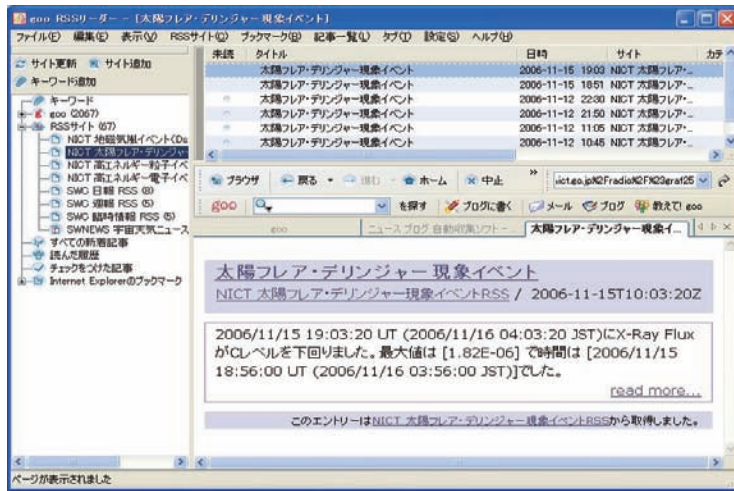


図2. RSSによる宇宙天気情報配信の例

3. 月の宇宙環境について

図3に示したように月の軌道の約 2/3 は太陽風中で、約 1/3 は地球磁気圏中にある。地球と違い、月の磁場は非常に弱く大気がほとんどないため、太陽風中では月の表面に直接、太陽風が降り注ぐ。銀河宇宙線や太陽高エネルギープロトンも直接、月の表面に到来するため、月の表面で活動する場合は、それらの影響を直接受けることになる(藤高他、2004)。表2に月および火星での銀河宇宙線による被曝量を示す(Rainer and Reitz, 2007)。表2から銀河宇宙線だけでも長期間滞在すると大きな被曝量があることがわかる。表3に大きな太陽高エネルギープロトン現象による月での被曝量を示す。銀河宇宙線は、惑星間空間擾乱により散乱されるため、そのフラックスの変動は太陽活動と逆相関の関係にある。一方、大きな太陽高エネルギープロトン現象は太陽活動が高いときに発生する傾向がある。太陽活動の極大期付近では銀河宇宙線のフラックスは小さくなるが、大きな太陽高エネルギープロトン現象に遭遇することを心配する必要がある。逆に太陽活動の極小期付近では、大きな太陽高エネルギープロトン現象に遭遇する確率は小さくなるが、銀河宇宙線のフラックスが大きくなる。

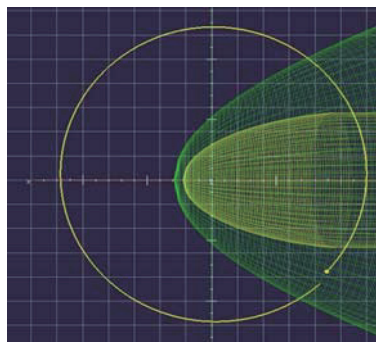


図3. 月の軌道と地球磁気圏

表2. 月および火星における銀河宇宙線による被曝(Rainer and Reitz, 2007)

Table 11.6. Mission doses from galactic cosmic rays for Reference Missions to the Moon and Mars.

Spacecraft shield thickness g cm ⁻²	Solar activity	Shield material	BFO-equivalent dose rates			BFO-mission equivalent dose/mSv								
			in space mSv a ⁻¹	on Moon mSv a ⁻¹	on Mars [§] mSv a ⁻¹	Moon, 190 days			Mars, 450 days			Mars, 47 days		
						10 d trip	180 d stay	190 d total	420 d trip	30 d stay	450 d total	422 d trip	525 d stay	947 d total
1 (pressure vessel)	1977 min	Alu	711.7	355.9		19.5	175	195	818.4		828	822.3		993
		PE	694.7	347.4	119	19.0	171	190	798.8	9.8	809	802.6	171	974
		Alu	271.7	135.9		7.4	67.0	74.4	312.4		317	313.9		402
	1970 max	PE	265.2	132.6	61	7.2	65.3	72.6	305.0	5.0	310	306.4	87.7	394
5 (equipment room)	1977 min	Alu	646.9	323.5		17.7	159.4	177	743.9		754	747.4		918
		PE	584.3	292.2	119	16.0	144	160	671.9	9.8	682	675.1	171	846
		Alu	255.6	127.8		7.0	63.0	70.0	293.9		299	295.3		383
	1970 max	PE	229.2	114.6	61	6.3	56.6	62.8	263.6	5.0	269	264.8	87.7	353
10 (shelter)	1977 min	Alu	589.0	294.5		16.1	145.1	161	677.3		687	680.5		852
		PE	499.0	249.5	119	13.7	123.0	137	573.8	9.8	584	576.5	171	748
		Alu	239.5	119.8		6.6	59.0	65.6	275.4		280	276.6		364
	1970 max	PE	198.7	99.4	61	5.4	49.0	54.4	228.4	5.0	233	229.6	87.7	317
20	1977 min	Alu	517.6	258.8		14.2	127.5	142	595.2		605	598.0		769
		PE	414.0	207.0	119	11.3	102.0	113	476.1	9.8	486	478.3	171	649
		Alu	217.7	108.9		6.0	53.7	59.6	250.3		255	251.5		339
	1970 max	PE	166.3	83.2	61	4.6	41.0	45.5	191.2	5.0	196	192.1	87.7	280

[§] minimal shielding only

表3. 大きな太陽高エネルギープロトン現象による月での被曝(Rainer and Reitz, 2007)

Table 11.4. Worst[§] case SPE radiation exposures in Sv during different mission phases for critical tissues under different mass shielding, given in parentheses in equivalent g/cm² aluminium; lens = ocular lens; BFO = blood-forming organs.

Mission phase	Concluding charges	Space suit (0.3)			Pressure vessel (1)			Equipment room (5)			Radiation shelter (10)		
		Skin	Lens	BFO	Skin	Lens	BFO	Skin	Lens	BFO	Skin	Lens	BFO
Free space	Z = 1	173.80	66.80	3.78	55.40	31.80	3.14	5.77	5.01	1.68	2.26	2.13	1.06
	Z = 2	114.90	13.30	0.40	8.20	3.30	0.35	0.66	0.49	0.24	0.35	0.29	0.19
	3 ≤ Z ≤ 10	5.30	0.90	0.01	0.50	0.20	0.01	0.02	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	11 ≤ Z ≤ 20	0.90	0.20	0.01	0.20	0.10	0.01	0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	21 ≤ Z ≤ 28	0.20	0.10	0.01	0.10	0.10	0.01	0.02	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	Total	295.10	81.30	4.21	64.40	35.50	3.52	6.48	5.54	1.93	2.62	2.43	1.26
Lunar surface	Z = 1	86.90	33.40	1.89	27.70	15.90	1.57	2.89	2.51	0.84	1.13	1.07	0.53
	Z = 2	57.45	6.65	0.20	4.10	1.65	0.18	0.33	0.25	0.12	0.18	0.15	0.10
	3 ≤ Z ≤ 10	2.65	0.45	<0.01	0.25	0.10	<0.01	0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	11 ≤ Z ≤ 20	0.45	0.10	<0.01	0.10	0.05	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	21 ≤ Z ≤ 28	0.10	0.05	<0.01	0.05	0.05	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	Total	147.55	40.65	2.11	32.20	17.75	1.76	3.24	2.77	0.97	1.31	1.22	0.63
Martian surface	Total	0.45	0.44	0.32	0.44	0.42	0.31	0.38	0.37	0.28	0.33	0.32	0.25

[§] 23 February 1956 event (GLE 5) as approximated by 10X flux of 29 September 1989 event (GLE 42).

4. 月探査の支援について

JAXA では、将来の有人月探査なども視野に入れて、月惑星探査センターの設立が検討されている。NICT の宇宙天気情報センターでは、宇宙環境をほぼリアルタイムでモニターしており、迅速な対応が可能である。日本の月・惑星探査において、図4に示すような連携が考えられる。

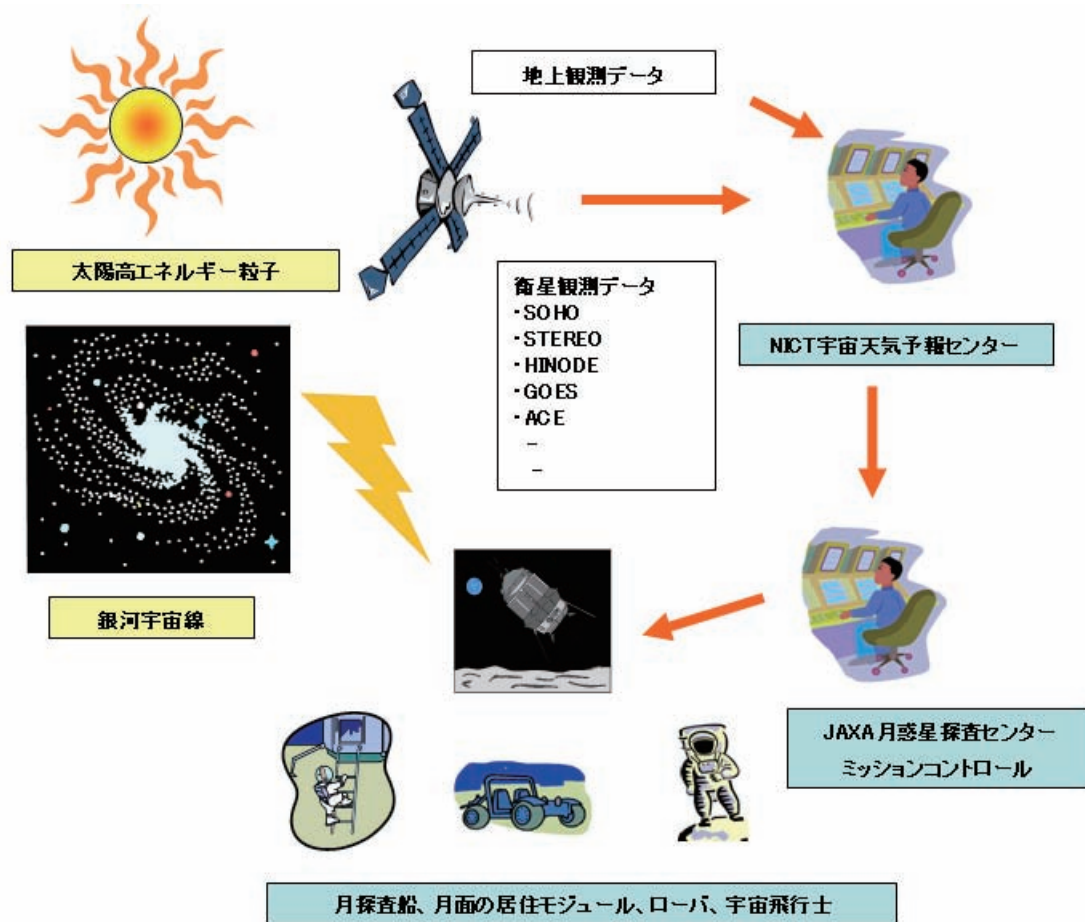


図4. NICT 宇宙天気情報センターによる月探査の支援

例として、2006年12月13日2時14分UTに発生したX3/4Bフレアに関連した現象について考えてみる。図5にGOES衛星で観測されたX線フラックス、高エネルギー粒子フラックス、磁場の南北成分と地上の中性子モニターのデータを示す。このイベントでは、フレアの約40分後に高エネルギープロトン(100MeV)の増加が検出され、100MeV以上のプロトン粒子のフラックスは13日5時25分UTに最大88.9PFUとなった。この現象では地上の中性子モニターでもフラックスの上昇が観測された。惑星間空間擾乱は、約36時間後の14日の14時14分UTに地球周辺に到来して地磁気嵐を引き起こした。この例では、フレア発生後、高エネルギープロトンの到来まで約40分程度の遅れがあり、フレアを観測した段階で関連現象などの分析から高エネルギープロトン到来の警報が出せる可能性を示唆している。しかしながら、エネルギーの高いプロトンほど到来する時間が早くなるため、フレア発生後、迅速に警報を出す必要があり、今後一層の研究が必要である。

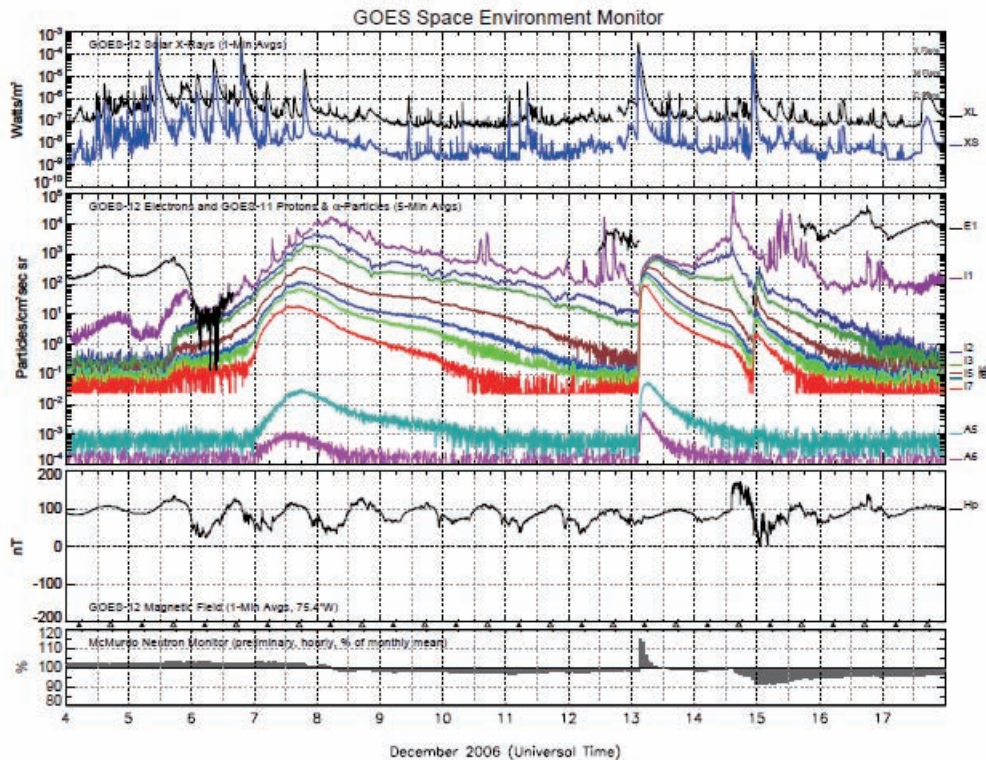


図5. 2006年12月の現象時の太陽フレア活動および太陽高エネルギー粒子フラックスの増加
(NOAA/NGDC 提供)

5. おわりに

近年、ふたたび月の有人探査を目標とした月探査行われるようになってきた。NICT 宇宙天気情報センターでは、このような動きを視野に入れ、有人月探査の支援について検討をはじめたところである。人類の宇宙進出は長年の夢であり、これが安全に行われるために宇宙天気情報の活用が重要になると考えている。

6. 参考文献

藤高、福田、保田(放射線医学総合研究所)編、宇宙からヒトを眺めて- 宇宙放射線の人体への影響 -, 研成社、2004年

加藤、川口、間近にせまる月探査ラッシュ、ニュートン、2006年12月

Rainer F. and G. Reitz, Space weather impacts on space radiation protection in Space Weather - Physics and Effects - (Bothmer, V., and I.A. Daglis eds.), Springer, 2006

渡辺、大高、ニューラルネットワーク法による宇宙環境擾乱予報、信学技法、A・P98-98、RC98-143、pp.43-48、1998年10月

亘、宇宙天気予報小特集 2. 宇宙環境擾乱による障害と宇宙天気予報、プラズマ核融合学会誌、Vol.82 No.11, pp.739-744、2006年11月