

# Analysis of Radiation Damage in On-orbit Solar Array of Venus Explorer AKATSUKI

Hiroyuki Toyota, Takanobu Shimada, Yu Takahashi, Takeshi Imamura  
ISAS/JAXA, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara, Kanagawa 252-5210, Japan

Yuko Hada, Takako T Ishii  
Kwasan Observatories, Kyoto University,  
17-1 Kitakasan-ohmine-cho, Yamashina-ku, Kyoto, 607-8471 Japan

Hiroaki Isobe, Ayumi Asai  
USSS, Kyoto University, 17-1 Kitakasan-ohmine-cho, Yamashina-ku, Kyoto, 607-8471 Japan

Daikou Shiota  
RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan

## Abstract:

This paper describes an analysis of radiation damage in solar array of Venus explorer AKATSUKI<sup>1)</sup> observed on orbit. The output voltage of the solar array have shown sudden drops, which are most reasonably associated with radiation damage, three times since its launch. The analysis of these radiation damage is difficult, because no direct observation data of the spectra and the amount of the high-energy particles is available. We calculated the radiation damage using the RDC method assuming a typical spectral shape of protons<sup>2)</sup>. The proton intensity was estimated from the corona mass ejection (CME) speed<sup>3)</sup> obtained from images by the STEREO satellite. Fig. 1 shows the differential fluence of the protons used in the calculation, and Fig. 2 shows the results. The proton fluence ten times larger than estimated by the CME speed gives damage which agrees well with the telemetry data. We are examining the proton fluence for its validity at the moment.

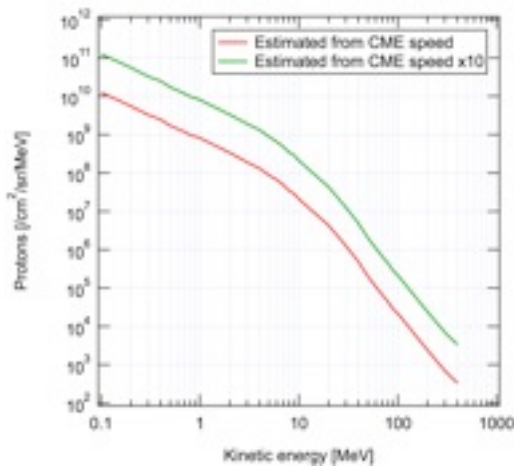


Fig. 1 Differential fluence of protons used in calculation of radiation damage in solar array.

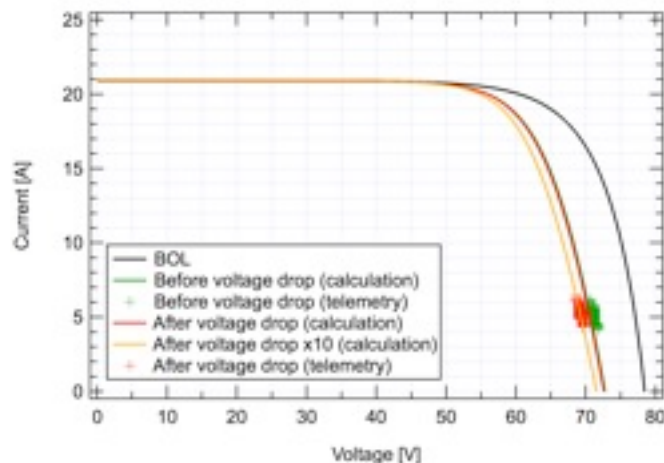


Fig. 2 Calculated IV characteristics and telemetry data of solar array before and after sudden voltage drop.

## References

- [1] M. Nakamura et al., *Earth Planets Space*, Vol. 63, pp. 443-457 (2011).
- [2] N. Gopalswamy et al., *Journal of Geophysical Research*, Vol. 109, A12105 (2004).
- [3] R.A. Mewaldt et al., *Proceedings of 30th International Cosmic Ray Conf.*, pp. 107-110 (2008).

# 金星探査機あかつき搭載太陽電池パネルの軌道上放射線劣化解析

豊田裕之、嶋田貴信、高橋優、今村剛（JAXA宇宙科学研究所）  
羽田裕子（京大理附属天文台）、磯部洋明、浅井歩（京大宇宙ユニット）  
石井貴子（京大理附属天文台）、塩田大幸（理化学研究所）

## 1 はじめに

金星探査機あかつきは、2010年5月に打ち上げられ、同年12月に金星に接近したが、周回軌道投入に失敗し、現在は金星に近い軌道で太陽を公転している。これまでに、あかつきに搭載された太陽電池の出力電圧に、3回にわたって顕著な低下が確認された。我々はその原因が太陽由来の陽子線であると考え、解析を行ってきた。惑星間を飛翔する探査機において急激な太陽電池の放射線劣化が確認されることは非常にまれであり、貴重な観測データである。

## 2 あかつきの概要

金星探査機あかつきの外観を図1に示す。探査機の総質量は502 kgであり、うち189 kgを酸化剤と燃料が占め、金星を観測する5台のカメラの質量は合計33 kgである。

あかつきは、南北に突き出した2翼の太陽電池パネルを備え、太陽を追尾するための回転機構を備える。パネルの寸法は1.43 m × 1.036 mで、長さ0.9 mのブームによって支持される。

パネルの太陽光入射面にはシャープ製宇宙用3接合太陽電池セル（JAXA-QTS-2130/502、変換効率28.3%）が搭載されている。各太陽電池セルの表面には、低エネルギーの放射線を遮蔽する目的で、厚さ100 μmの反射防止膜付きCMGカバーガラスが実装されている。解析による予想発生電力は、太陽から最も遠ざかる1.0781 AUで480 W以上、金星周回軌道上で660 W以上である。太陽電池パネルの裏面は、Optical Solar Reflector (OSR) と呼ばれる反射板で覆われており、金星アルベドの

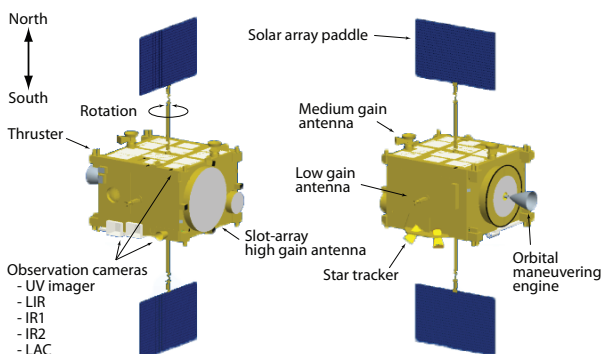


図1 金星探査機あかつき

入射を抑制し、パネルの温度上昇を低減する設計になっている。太陽電池パネルの設計温度は-170°C~+184°Cである。

太陽電池パネルの発生電圧は、シリーズスイッチングレギュレータにより降圧安定化される。探査機の太陽距離が大きく変化するため、太陽電池パネルの温度変動が大きく、出力電圧も大きく変化するため、地球周回衛星でよく用いられるシャントレギュレータでは効率が悪いためである。

あかつきプロジェクトの目的は、金星大気の運動を紫外から赤外までをカバーする5台のカメラで観測し、その謎を解き明かすことである1)。

## 3 太陽電池パネルの軌道上運用状況

### 3.1 運用の概要

金星探査機あかつきは、2010年5月20日（UTC）にH2Aロケット17号機により打ち上げられ、現在も運用されている。太陽電池パネル関係のテレメトリデータを図2に示す。

打ち上げ後、探査機はまず太陽から1.0781 AUまで遠ざかり、この時太陽電池パネルの温度は+33°Cまで低下した。その後探査機が再び太陽に近

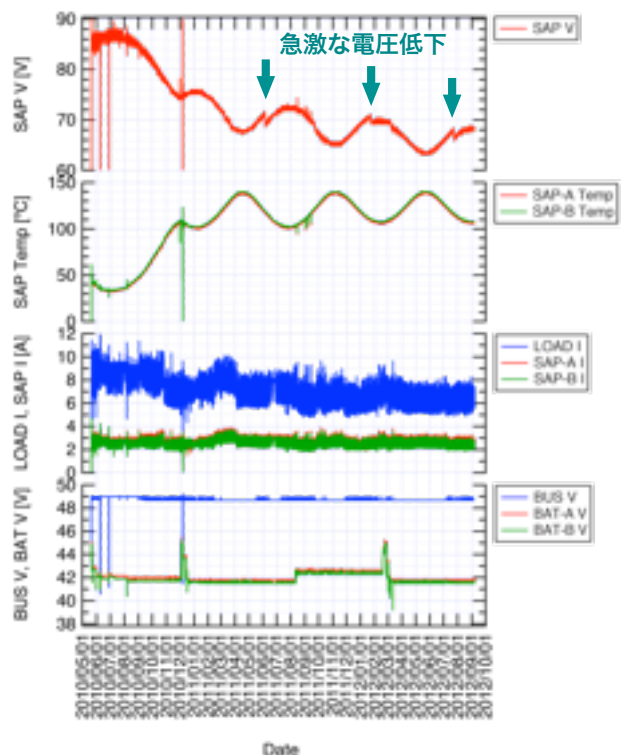


図2 太陽電池パネル関係テレメトリデータ

付くにつれて太陽電池パネルの温度は上昇し、探査機が2010年12月6日 (UTC) に金星に会合した際には+106°Cであった。残念ながらあかつきは金星周回軌道投入に失敗し、現在は太陽距離0.61 AU~0.7 AUの太陽を公転する軌道にある。太陽電池パネルの温度は太陽距離に応じて+100°C~+140°Cで変動している。これは金星周回軌道上での予測温度+144°Cよりも低い。太陽電池パネルの発生電圧は、温度変動にあわせて推移している。

あかつきは2015年11月に金星に会合し、再び周回軌道投入を試みる予定である。

### 3.2 放射線劣化解析

#### 太陽電池パネル発生電圧の急激な低下

図2中に矢印で示したように、太陽電池パネルの発生電圧にはこれまでに3回の急激な低下が見られた。図3は一回目の電圧低下 (2011年6月5日) を拡大したもので、約2時間かけて徐々に1.63 V低下したことがわかる。

我々は次に挙げる3つの原因を検討した。

- 電気回路の故障
- 温度・負荷の変動
- 放射線劣化

まず、電気回路の故障であれば、電圧が徐々に低下することは考えにくい。次に、確認された電圧変動を引き起こし得る温度・負荷の変動はなかった。最後に、放射線劣化であれば、高エネルギー粒子に曝されている間、電圧が徐々に低下する挙動を示しても不思議はない。そして、時間的に整合する2つの太陽フレアが発生していたことがわかった。

#### 放射線劣化解析の方針

しかしながら、電圧低下とこれらの太陽フレアの解析を難しくする要因が2つある。それは、あかつ

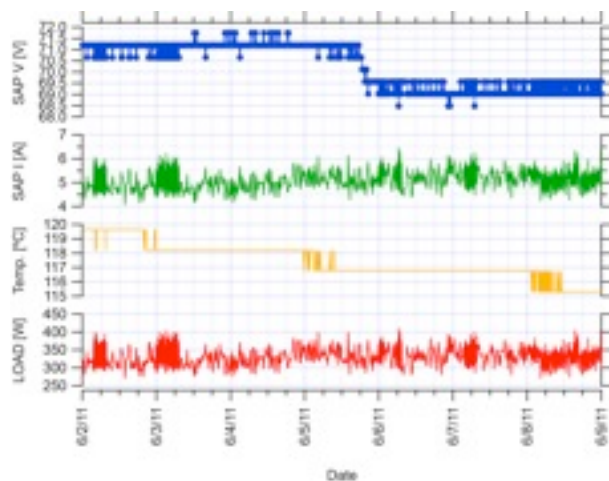


図3 2011年6月5日に発生した急激な電圧低下を示すテレメトリデータ

つきが太陽電池パネルの発生電圧の安定化にシリーズスイッチングレギュレータを用いていること、太陽フレアによって放出された高エネルギー陽子線 (Solar Energetic Proton, SEP) の直接の観測データがないことによる。

太陽電池および負荷の特性と、シリーズスイッチングレギュレータ使用時の動作点のイメージを図4に示す。この時、太陽電池の動作点は定電圧領域に存在する。したがってある動作点の情報、すなわちテレメトリデータが与えられた時に、電流電圧特性全体を推定することはきわめて難しい。

太陽フレアが発生したときのあかつきの位置を図5に示す。あかつきは太陽から見て地球と反対側にあり、太陽から放出されたコロナ (Corona Mass Ejection, CME) はあかつき方向に飛来したと考えられる。そのためSEPのフルエンス、スペクトル等の観測データは存在しない。これを90°ずれた位置から撮影していたNASAのSTEREO衛星による観測画像だけが、手がかりとなる。

そこで、我々は二つのアプローチで解析を試みた。一つは、CMEの速度からSEPのフルエンスを見積もり、相対損傷係数 (Relative Damage

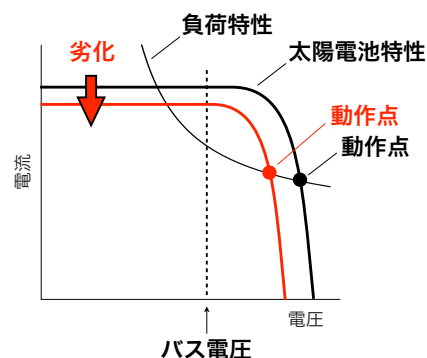


図4 太陽電池特性、負荷特性およびシリーズレギュレータ使用時の動作点のイメージ

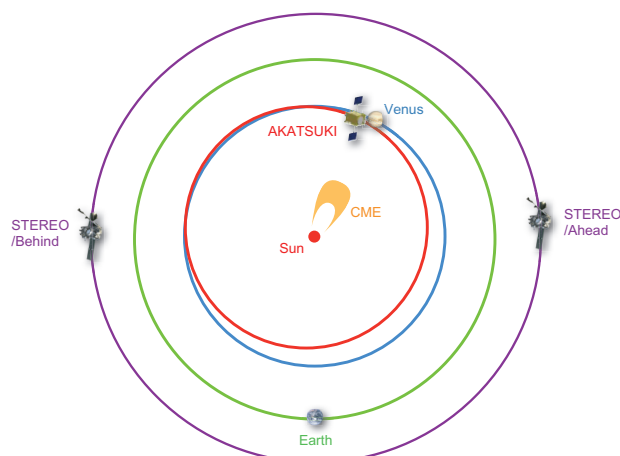


図5 太陽フレア発生時の太陽、地球、あかつき、STEREOの位置

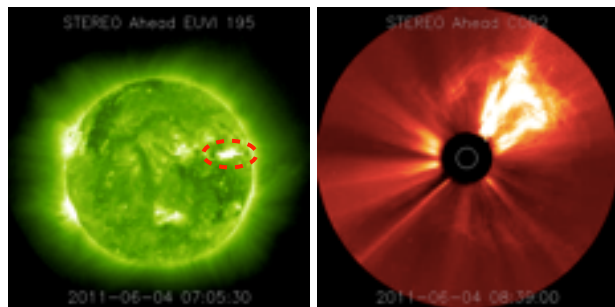
Coefficient, RDC) に基づいて太陽電池の劣化を推定する手法だ。しかし後述するように、この方法で推定した劣化量は、観測データと一致しなかった。もう一つの方法は、観測された劣化量を与えるSEPフラックスを、RDCを用いて逆算する手法だ。便宜上、前者をアプローチ1、後者をアプローチ2と呼ぶことにする。

### アプローチ1

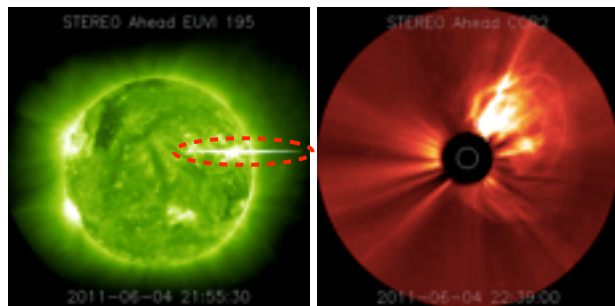
STEREO/Aheadによる観測画像を図6に示す。図6 (a), (b) のフレア1が2011年6月4日 6時50分頃に発生し、(c), (d) のフレア2が同日 21時50頃に発生した。白色コロナグラフの連続写真から、フレア1によるCME1の発生時速度を1200 km/s、フレア2によるCME2の発生時速度を2200 km/sと推定した。CME2はCME1に追いつき、合体してあかつきに到達したと考えている。

CMEが連続して発生した場合の2番目のCMEの速度と、10 MeV以上のプロトンフルエンスの関係を図7に示す<sup>2)</sup>。CME2の速度は2200 km/sであるから、プロトンフルエンスは $10^2 \sim 10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ と推定される。

続いて、プロトンのスペクトルを典型的な形状に仮定した<sup>3)</sup>。また、太陽電池セルのRDCを図9に示す。実際のところ、数種のスペクトル形状を用いて放射線解析を行ったが、図9のRDCからもわかるように、損傷は4~5 MeVのプロトンフルエンスに支



(a) フレア1、極端紫外線 (b) フレア1、白色コロナグラフ



(c) フレア2、極端紫外線 (d) フレア2、白色コロナグラフ

図6 STEREO/Aheadによる太陽フレアの観測画像

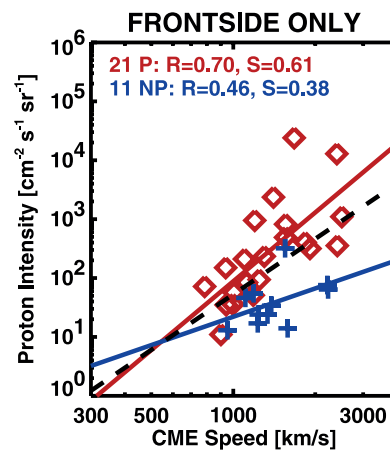


図7 連続して発生したCMEの速度と10 MeV以上のプロトンフルエンスの関係<sup>2)</sup>

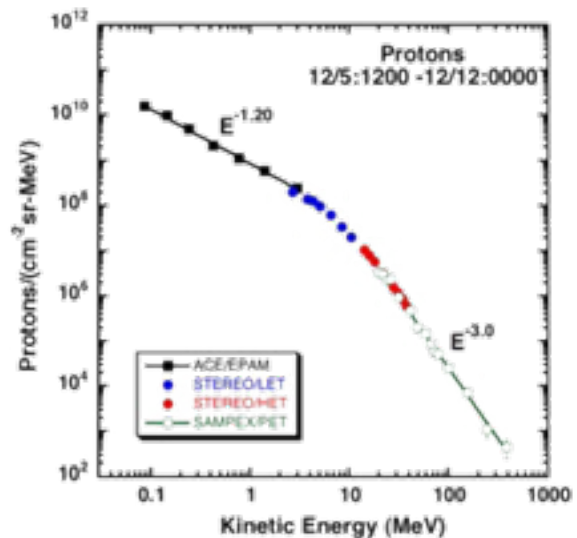


図8 解析に利用したプロトンスペクトル形状<sup>3)</sup>

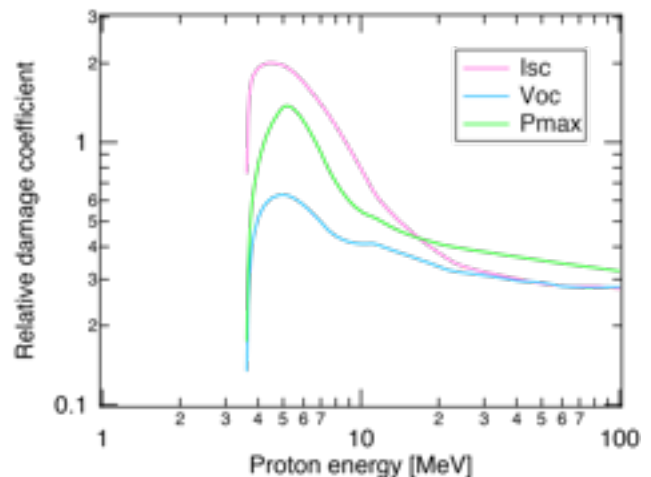


図9 太陽電池セルのRDC

配される。そのためスペクトルの形状の変化が劣化量に与える影響は小さかった。

さて、10 MeV以上のプロトンフルエンスが図7から求めた値と一致するように、図8のスペクトルを相似変形させるわけだが、図8の10 MeV以上の積分フルエンスは $2.79 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ で、図7から

求めた値の範囲内であった。そこで図8のスペクトルをそのまま利用して、放射線劣化解析を行った。

解析結果を図10に示す。緑の十字は電圧低下直前のテレメトリデータ、赤の十字は電圧低下直後のテレメトリデータである。また、黒の曲線はミッション初期 (Beginning Of Life, BOL) の電流電圧特性の解析値、緑の曲線は電圧低下直前の解析値、赤の曲線は電圧低下直後の解析値である。電圧低下直前のテレメトリデータ (緑十字) が解析値 (緑曲線) とよく一致していることから、解析の妥当性が確かめられた。一方で電圧低下直後のテレメトリデータ (赤十字) に対し、解析値 (赤曲線) は劣化が小さすぎる結果となった。電圧低下直前の解析値はテレメトリデータと一致していることから、RDCによる劣化推定の精度は十分に高く、CMEの速度からプロトンフルエンスを推定した過程の誤差が大きいと考えられる。

## アプローチ2

そこで、観測データに一致する放射線劣化を与えるプロトンフラックスを、RDC法により逆算した。それを元に推定したプロトンスペクトルを図11に示す。また、劣化後の電流電圧特性は、図10中に橙の曲線で示したものである。図11のスペクトルは、図8のスペクトルの10倍のフラックスを持つ。このようなSEPイベントが発生し得るかどうかを評価するのは判定材料が不足しており難しいが、1991年3月23日に発生した観測史上最大のSEPイベントではこれと同水準のプロトンが放出されており、発生する可能性は十分にあるといえる。

## 4 おわりに

本稿では、金星探査機あかつきの太陽電池パネルに発生した急激な電圧低下に注目し、評価を行った。約2時間かけて徐々に電圧が低下した挙動から、その原因を太陽由来の高エネルギープロトンであると推定し、観測された劣化量からプロトンのスペクトルを推定した。惑星間を飛翔する探査機においてこのように一定の明確さを持った放射線劣化が観測された例は少ないため、太陽電池パネルの設計の立場からも、宇宙環境の研究の立場からも、非常に貴重な事例であるといえよう。

## 参考文献

- [1] M. Nakamura *et al.*, Earth Planets Space, Vol. 63, pp. 443-457 (2011).
- [2] N. Gopalswamy *et al.*, Journal of Geophysical Research, Vol. 109, A12105 (2004).
- [3] R.A. Mewaldt *et al.*, Proceedings of 30th International Cosmic Ray Conf., pp. 107-110 (2008).

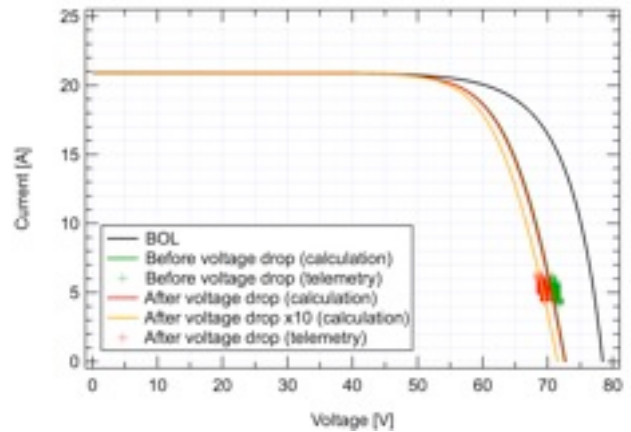


図10 ミッション初期、電圧低下直前、電圧低下直後の太陽電池パネルの電流電圧特性のテレメトリデータと解析値

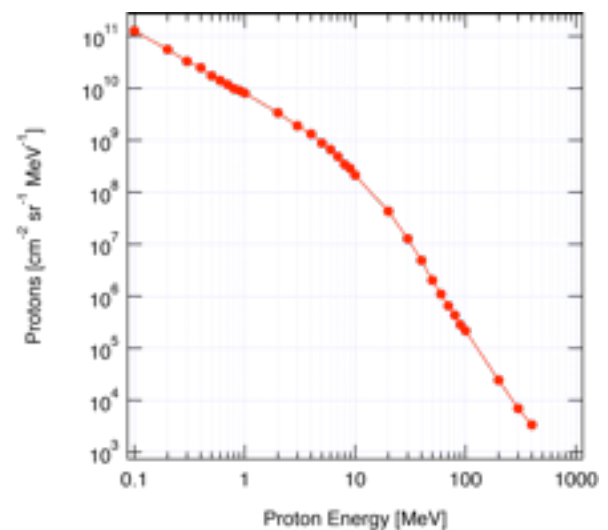


図11 観測データに一致する放射線劣化を与えるプロトンスペクトル