

### 3次元ガス飛跡検出器による宇宙放射線線量計測

慶大医/JAXA 寺沢和洋

KEK 佐々木慎一、岸本祐二、高橋一智、齋藤究、俵裕子

JAXA 永松愛子、勝田真登、榊田大輔、松本晴久、込山立人、布施哲人

神戸大 身内賢太郎

京大 谷森達、窪秀利

放医研 北村尚

### Space dosimetry with a three-dimensional gas tracking detector

*Kazuhiro Terasawa<sup>1,2</sup>, Tetsuhito Fuse<sup>2</sup>, Masato Katsuta<sup>2</sup>, Yuji Kishimoto<sup>3</sup>, Hisashi Kitamura<sup>6</sup>, Tatsuto Komiyama<sup>2</sup>, Hidetoshi Kubo<sup>5</sup>, Daisuke Masuda<sup>2</sup>, Haruhisa Matsumoto<sup>2</sup>, Kentaro Miuchi<sup>4</sup>, Aiko Nagamatsu<sup>2</sup>, Kiwamu Saito<sup>3</sup>, Shin-ichi Sasaki<sup>3</sup>, Kazutoshi Takahashi<sup>3</sup>, Toru Tanimori<sup>5</sup>, Hiroko Tawara<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> School of Medicine, Keio University, Hiyoshi 4-1-1, Kouhoku-ku, Yokohama, Kanagawa, 223-8521  
E-mail: terasawa@z6.keio.jp

<sup>2</sup> Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Sengen 2-1-1, Tukuba, Ibaraki, 305-8505

<sup>3</sup> Radiation Science Center, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Oho 1-1, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801

<sup>4</sup> Graduate School of Science, Kobe University, Rokko-dai 1-1, Nada-ku Kobe Hyogo, 657-8501

<sup>5</sup> Graduate School of Science, Kyoto University, Kitashirakawa-oiwakecho, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8502

<sup>6</sup> National Institute for Radiological Sciences (NIRS), Anagawa 4-9-1, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba, 263-8555

Abstract: Position-Sensitive Tissue-Equivalent Proportional Chamber (PS-TEPC) has been developed as a space dosimeter. The detector has position sensitivity and tissue equivalency. The PS-TEPC is a kind of a time projection chamber and three dimensional tracks can be obtained to measure the LET of each incident particle. The dose measurement was started inside the Japan Experimental Module (JEM) of the International Space Station (ISS) in December 2016.

*Key words*; Space Dosimetry, Dose Equivalent, LET, PS-TEPC,  $\mu$ -PIC, TEPC, RRMD-III, HIMAC

#### 1. はじめに

宇宙飛行士は、宇宙滞在時に銀河宇宙線により定常的な被曝を受ける。その線量率は地球上での被曝より2桁高く（地球周回低軌道では、0.5~1 mSv/d程度）、宇宙での滞在期間に大きな制限を加える。更に、突発的に発生する太陽フレアに伴う粒子線や、放射線帯を通過する際には捕捉粒子線から受ける被曝が追加される。

被曝線量限度は年齢と性別に依存し、現状で数百から1000 mSv以内にコントロールされているが<sup>1)</sup>、あくまで国際宇宙ステーション (International Space Station, ISS) 上での滞在を想定しており、月や火星への長期有人飛行の際には、それを上回る被曝（線量率も1 mSv/d以上）も想定される。その場合には、上限を変更する（より大きなリスクも許容する）、滞在期間を短くする（天体への到着を早める、地下へ潜るなど）、あるいはそれ以外の何らかの方

法（トータルの線量は同じでも低線量率ではリスクが低い可能性、薬剤によるリスク低減、個人差の利用、銀河宇宙線による被曝を抑えるために太陽活動極大期を選ぶなど）で実効的な線量を減らす、といった対策が必要となる。

測定器側からできる貢献は測定精度の向上であり、測定精度が宇宙滞在期間に直結する<sup>2,3)</sup>。NCRP等により測定器に依存した精度として30%以内が推奨されており<sup>4)</sup>、例えば、精度が50%から30%に向上すると、滞在期間は2割ほど増加する。

線量測定の対象となる宇宙放射線の種類の内訳はスペース・シャトル STS-89 における実測によると、陽子や重イオン等の荷電粒子が8割、中性子が2割程度であるが、中性子は2次中性子が主で、周辺の物質質量に依存するほか、測定精度が荷電粒子より劣り、全体の把握には注意が必要である<sup>3)</sup>。

能動型線量計としては、これまでに米 NASA が標準検出器として採用している Tissue Equivalent



Fig.1 Photo of the PS-TEPC (flight model) inside the Japan Experimental Module of the ISS. The system consists of two detection units (black color, the center of the photo) and a control unit (silver color, below the detection units).

Proportional Counter (TEPC)<sup>5)</sup>や国産の Real-time Radiation Monitoring Device-III (RRMD-III)<sup>6)</sup>等があるが、TEPCについては生体組織等価物質で構成されているものの位置検出ができず、線量計測に必要な LET の測定は粗い近似になってしまい（円筒形の場合は形状に依存する系統誤差が 51 %）、事実上、吸収線量のみの実測となっている。

一方、RRMD-III は測定精度についての基準を満たしているものの、Si 検出器であるために中性子への感度が期待できない。

そこで、両線量計の特徴である生体組織等価性と位置有感性の両方を兼ね備えた新たな線量計 (Position-Sensitive Tissue-Equivalent Proportional Chamber, PS-TEPC) の開発に着手した<sup>7,8)</sup>。

## 2. PS-TEPC とこれまでの結果について

PS-TEPC は生体組織等価物質で構成された 3 次元気体 Time Projection Chamber (TPC) であり、3 次元飛跡から検出器内での粒子の経路長とエネルギー付与を実測することで LET 値を得ることができる<sup>7)</sup>。

地上での加速器を用いた粒子照射 (proton, He, C, Si, Ar, Fe) により、LET が最も小さく精度が悪い proton に対しても 30%未満の分解能を達成したことを受け<sup>9)</sup>、軌道上実証実験を開始した。

## 3. 軌道上での実測開始

2016 年 12 月 9 日、22:26:47 に打ち上げられた HTV-6 号機により ISS へ実機を送り、同年 12 月 15 日に Japan Experimental Module (JEM)の与圧部内に

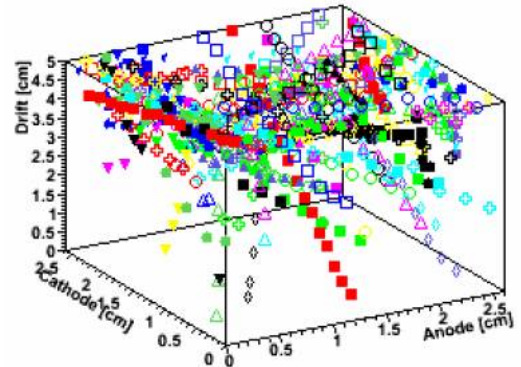


Fig.2 Typical three dimensional tracks of incident particles reconstructed by the PS-TEPC. The effective volume is  $2.5 \times 2.5 \times 5 \text{ cm}^3$ .

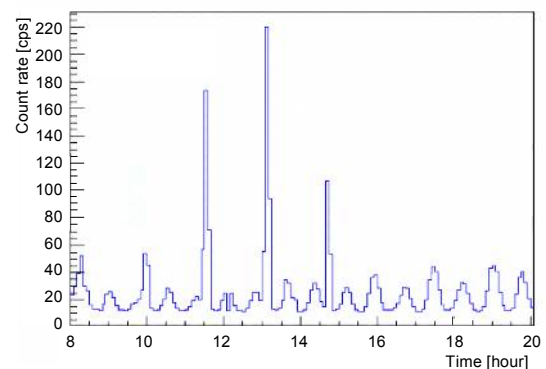


Fig.3 Time profile of the count rate of incident particles in the detector measured by PS-TEPC (February, 2018)

で測定を開始した。均質型の 3 次元飛跡検出器による宇宙放射線中の重イオンの飛跡取得を軌道上で初めて行い、初期チェックアウト作業を完了した後、定常運用へと移った。

JEM 内に設置した PS-TEPC の写真を Fig.1 に示す。PS-TEPC は検出部 2 つと制御部で構成され、検出部上部の円筒内が有効領域となっている。

初期データとして、エネルギー情報から再構成した 3 次元飛跡の例を Fig.2 に示す。検出器へ入射した各粒子のこれらの飛跡から粒子毎の LET 値を導き、線量をイベント毎に測定することができる。

また、粒子カウント数の時間変化について、Fig.3 に示す。ISS は 90 分で地球周回軌道を 1 周し、ブラジル上空を通過する際には、放射線帯の一部（南大西洋異常地域）を 5 分ほど通過するため、その度にカウント数が増加し、鋭いピークとなる。また、45 分毎に北側か南側の極域付近を通過するため、同様にカウント数が増加し緩やかなピークとなる。

現在、取得データについては解析中であり、LET 分布や線量データ等、結果を順次報告していく予

定である。

## 謝辞

以下の各機関・施設におけます研究課題として採択され研究が実施されていますのでここに感謝申し上げます。

- ・ 宇宙航空研究開発機構, (財)日本宇宙フォーラムが推進している「宇宙環境利用に関する地上研究公募」プロジェクトの一環として行っておりました実験研究の継続版
- ・ 放射線医学総合研究所・HIMAC 施設共同利用研究課題、サイクロトロン施設研究課題
- ・ 高エネルギー加速器研究機構・共同開発研究課題
- ・ 宇宙航空研究開発機構・宇宙環境利用科学委員会・研究/調査グループで行っておりました研究の継続版

## 参考文献

- 1) JAXA、国際宇宙ステーション搭乗宇宙飛行士・放射線被ばく管理規定、ISS 搭乗宇宙飛行士の生涯実効線量制限値 (2013).
- 2) Terasawa, K. et al.; Development of Position Sensitive Tissue Equivalent Proportional Counter (PS-TEPC) and establishment of dosimetric technique in the International Space Station (ISS) with PS-TEPC, *SUR*, **24**, 322 (2008).
- 3) Terasawa, K. et al.; Development of Position Sensitive Tissue Equivalent Proportional Chamber (PS-TEPC) for Space Dosimetry on board the International Space Station, *SUR*, **30** (2016).
- 4) *NCRP Report No.142, Recommendations of the National Council on Radiation Protection and Measurements*, (2002).
- 5) Badhwar, G.D. et al.; Measurements on the shuttle of the LET spectra of galactic cosmic radiation and comparison with the radiation transport model, *Radiat. Meas.*, **139**, 344 (1994).
- 6) Doke, T et al.; Measurements of LET-distribution, dose equivalent and quality factor with the RRMD-III on the Space Shuttle Mission STS-84, -89 and-91, *Radiat. Meas.*, **33**, 373 (2001).
- 7) Terasawa, K. et al.; Position-sensitive tissue-equivalent proportional counter (PS-TEPC) for space dosimetry, *KEK Proc.* **2005-12**, 63 (2005).
- 8) Kishimoto, Y. et al.; Basic performance of a position-sensitive tissue-equivalent proportional chamber (PS-TEPC), *Nucl. Instr. Meth.*, **A732**, 591(2013) .
- 9) Terasawa, K. et al.; Development of Position-Sensitive Tissue-Equivalent Proportional Chamber (PS-TEPC) as an active dosimeter, *SUR*, **13** (2017).