

# EXPACS: Excel-based Program for calculating Atmospheric Cosmic-ray Spectrum 利用の手引き

(2018年12月21日改訂)

日本原子力研究開発機構 放射線挙動解析研究グループ 佐藤達彦

[nsed-expacs@jaea.go.jp](mailto:nsed-expacs@jaea.go.jp)

## I. はじめに

EXPACS とは、Excel-based Program for calculating Atmospheric Cosmic-ray Spectrum の略で、大気中の任意の地点・時間における宇宙線フラックス及びそのエネルギースペクトルを計算可能なプログラムである。指定したセルに高度・緯度経度（もしくは地磁気強度）・時間（もしくは太陽活動強度）・周辺条件を入力すると、PARMA (PHITS based Analytical Radiation Model in the Atmosphere)モデルを用いてその条件に対する中性子・陽子・原子番号 28 (Ni) より軽い原子核・ $\mu$ 粒子・電子・陽電子・光子フラックスを自動的に計算し、その結果をグラフ化する。また、計算したフラックスから、宇宙線による人体の被ばく線量や空気の吸収線量も計算することができる。さらに、Version 4.0 より、天頂角に対する角度微分フラックスが計算可能となった。

計算モデルの詳細は、文献[1-4]に記載されている。また、EXPACS の概要は下記ホームページで説明されている。そこで、本稿では、その使用方法に的を絞って説明する。

URL: <http://phits.jaea.go.jp/expacs/>

## II. 入力データ

ユーザーは、以下に示す情報を”Main”シートの B7~17 セルに入力する必要がある。

**B7:** 高度もしくは大気深度。計算モデルの適用範囲が大気深度  $0.15\sim 1095\text{g/cm}^2$  (高度約  $0.5\sim 63\text{km}$  に相当) であるため、その範囲外の値を設定した場合は、警告が表示される。高度を指定した場合、US Standard Atmosphere 1976[5]にしたがって大気深度を計算し、その結果を B24 セルに表示する。ただし、B8 セルで緯度を指定した場合は、NRL-MSISE-00[6]を用いて計算した各緯度の平均的な高度-大気深度関係を使って変換する。

**B8,9:** 緯度経度もしくは地磁気強度。緯度、経度で指定する場合は、北緯及び東経を度単位で入力。例えば、東京なら緯度 35.7, 経度 139.7 となる。EXPACS は、指定された緯度、経度より、その地点における vertical cut-off rigidity を計算し、その結果を B25 セルに表示する。その際、MAGNETOCOSMICS [7]を用いて計算した 2007 年 7 月における vertical cut-off rigidity データベースを利用する。また、地磁気強度を直接入力する場合は、C8 セルで(GV)を選択し、B8 セルに vertical cut-off rigidity を GV 単位で入力する。Vertical cut-off rigidity とは、地磁気の強さを表す指標で、ある宇宙線が地球に向かって垂直に入射したときに大気上空に到達できる荷電粒子の Rigidity (曲がりにくさ: 高エネルギーかつ電荷の小さい放射線ほど大きい) の下限値を表す。その最小

値は、磁極付近の OGV であり、現在の最大値は、シンガポール付近の約 17.6GV であるが、長期間かけてゆっくりと変動する。ただし、その変動は EXPACS では考慮していないため、100 年以上前の Vertical cut off rigidity を緯度経度から計算する場合、その誤差が大きくなることに注意する必要がある。

**B10-12:** 時間もしくは太陽活動強度。年月日 (グリニッジ標準時) を指定した場合、EXPACS は、世界各地にある中性子モニタ (表 1 参照) の計数率より太陽活動強度 (W-index) を計算し、その結果を B26 セルに表示する。また、中性子モニタによる宇宙線観測が始まる 1951 年以前の W-index は、Usoskin ら[8]が太陽黒点数より再構築した太陽活動強度より計算する。これにより、マウンダー極小期 (1647-1699 年) を除く、1611 年から現在までの W-index が計算可能となった。また、EXPACS に W-index 値が含まれていない直近の宇宙線フラックスは、NMDB の Web サイト[9]より最新の計数率(corrected count rate)をダウンロードし、その値を B10 セルに直接入力することにより計算可能である。ただし、この方法により計算した W-index は、他の中性子モニタの計数率も含めて評価した W-index と異なることに注意する必要がある。一方、W-index を直接入力する場合は、C10 セルで W 値 (黒点数) を選択し、B10 セルにその値を入力する。W-index は黒点数と密接な関係にあり、太陽活動極小及び極大期の W-index は、それぞれ約 0 及び 150 となる。これらの値は、EXPACS2 で採用していた値と違うことに注意する必要がある。宇宙線強度と W-index は負の相関関係があり、W=0 を入力すればほぼ安全側の評価が可能となる。

**B13,14:** 周辺環境パラメータ: 周辺環境による理想的な大気中の宇宙線スペクトルからの「ゆがみ」を考慮するためのパラメータ。中性子スペクトルのみに影響する。B13 セルで地表面を選択した場合、地面の水分含有率を入力。通常、0.15 程度。航空機内 (パイロット座席もしくは乗客座席) を選択した場合、航空機の質量(100ton)を入力。大型旅客機の場合は 2(100ton)程度。ただし、どちらの量も、理想的な環境におけるスペクトルからの「ゆがみ」の大きさを表すためのパラメータであり、純粋な物理量ではなく、条件により調整が必要となることに注意する必要がある。詳しくは、参考文献[4]を参照。

**B15:** 計算する線量の種類。実効線量、周辺線量当量、空気吸収線量から選択が可能である。実効線量を選択した場合は、ICRP (国際放射線防護委員会) Publication 116[10]と 123[11]に掲載された等方照射に対する実効線量換算係数を用いて宇宙線フラックスを線量に変換する。周辺線量当量を選択した場合は、200MeV 以下の中性子に対しては ICRP Publication 74[12]に掲載された H\*(10)に対する換算係数を、それ以外は PHITS で計算した H\*(10)に対する換算係数を用いて変換する。空気吸収線量を選択した場合は、電子・陽電子に対しては 10keV 以下の制限衝突阻止能(restricted collision stopping power)を、それ以外の放射線に対しては非制限衝突阻止能(unrestricted collision stopping power)を用いて変換する。

B16: 出力フラックスの単位を選択。 $(\text{cm}^2/\text{s}/(\text{MeV}/\text{n}))$ を選択した場合、原子核以外のスペクトルは、 $(\text{cm}^2/\text{s}/\text{MeV})$ と同等となる。

B17: 出力線量単位を選択。

適用範囲外の値を入力した場合、そのセルが赤色で表示され、A18-22セルに警告が表示される。その場合は、赤色セルに入力した値を正しい値に変更する必要がある。

### III. 出力データ

前節で入力した条件に対して、EXPACS は以下の情報を出力する。

B30-39: B15 で選択した線量の計算結果。B30セルに全ての宇宙線による合計値を、B31-39には各放射線の寄与をそれぞれ出力する。

D35-AL174: 指定した条件に対して計算した各粒子のフラックス。

### IV. 角度微分フラックスの計算方法

Version 4.0 より、天頂角に対する角度微分フラックスが計算可能となった。角度微分フラックスを計算するには、場所や時間など基本的な条件は Main シートで指定し、天頂角や計算したい放射線の種類を Angle シートで指定する必要がある。Angle シートでは、一度に4つの条件に対する角度微分フラックスを表示することができる。3行目に条件名を入力し、4行目で放射線を選択し、5行目に天頂角を  $\cos(\theta)$  もしくは度単位で入力し、6行目でブラックホールモードの有無を選択する。天頂角は、0度すなわち  $\cos(\theta)=1$  が鉛直下方向を表す。なお、方位角依存性は、現在のところ考慮できない。ブラックホールモードとは、大地からの反射粒子による寄与を全て除いた計算モードで、地中の宇宙線挙動解析に用いるインプットフラックスを計算したい場合などで有用となる。

計算結果は、35~174行目までに出力される。各条件に対して左側の値が角度微分フラックスで、右側は相対角度分布( $\text{sr}$ )となる。角度微分フラックスは、Main シートで計算した角度積分フラックスに相対角度分布( $\text{sr}$ )を乗じることにより導出している。

### V. シートの構成

EXPACS は、数多くのシートで構成されている。初期状態では”Main”, “Update Log”以外のシートは非表示に設定されているが、”再表示”コマンドを使うことにより、それ以外のシートも見ることができる。以下、各シートの役割を解説する。

- ✓ **Main**: 基本画面。その概要を図1に示す。A1セルを変更することにより言語の選択も可能（日本語・英語のみ対応）
- ✓ **Angle**: 角度微分フラックス計算画面。
- ✓ **Update Log**: 更新履歴
- ✓ **UpData**: 更新履歴用のデータシート
- ✓ **Data**: “Main”シートで使う選択枝などを書いたデータシート
- ✓ **Data-angle**: “Angle”シートで使う選択枝などを書いたデータシート
- ✓ **AngCal**: 角度微分フラックスを計算するためのメインシート

- ✓ **AngNeutron**: 中性子の角度微分フラックスを計算するためのシート
- ✓ **AngProton**: 陽子の角度微分フラックスを計算するためのシート
- ✓ **AngHe**: He イオンの角度微分フラックスを計算するためのシート
- ✓ **AngMuon**: ミューオンの角度微分フラックスを計算するためのシート
- ✓ **AngElePos**: 電子・陽電子の角度微分フラックスを計算するためのシート
- ✓ **AngPhoton**: 光子の角度微分フラックスを計算するためのシート
- ✓ **Neutron**: 中性子フラックス計算用シート
- ✓ **Primary**: 陽子や原子核など 1 次宇宙線フラックス計算用シート
- ✓ **Secondary**: 2 次宇宙線（陽子や原子核の 2 次宇宙線を含む、ただし中性子・ミューオンは除く）フラックス計算用シート
- ✓ **mu+**: 正ミューオンフラックス計算用シート
- ✓ **mu-**: 負ミューオンフラックス計算用シート
- ✓ **USAir**: US Standard Atmosphere 1976 で計算した高度-大気深度関係のデータベース
- ✓ **MSIS**: NRL-MSISE-00 で計算した緯度毎の高度-大気深度関係のデータベース
- ✓ **Rc**: MAGNETOCOSMICS で計算した緯度・経度毎の vertical cut-off rigidity データベース
- ✓ **DailyW**: 世界各地の中性子モニタ計数率より計算した W-index の日変動データベース
- ✓ **AnnualW**: Usoskin らが太陽黒点数より再構築した太陽活動強度より推定した W-index の年変動データベース
- ✓ **DCC**: “Main”シートの B15 セルで選択した線量に対する線量換算係数
- ✓ **ED**: 実効線量に対する線量換算係数のデータベース
- ✓ **H10**: 周辺線量当量 H\*(10)に対する線量換算係数のデータベース
- ✓ **AirDose**: 空気吸収線量を計算するためのデータベース
- ✓ **dEdxTable**: PHITS で計算した原子核に対する阻止能データベース
- ✓ **Ground**: 中性子フラックスの地表面効果を考慮するためのデータベース
- ✓ **Aircraft**: 中性子フラックスの航空機効果を考慮するためのデータベース

## VI. まとめ

本プログラムの使用方法に関する質問・改良の要望などは [nsed-expacs@jaea.go.jp](mailto:nsed-expacs@jaea.go.jp) までお願いいたします。

## 参考文献

- [1] T. Sato, “Analytical Model for Estimating the Zenith Angle Dependence of Terrestrial Cosmic Ray Fluxes”, *PLOS ONE*, 11(8): e0160390 (2016).
- [2] T. Sato, “Analytical Model for Estimating Terrestrial Cosmic Ray Fluxes Nearly Anytime and Anywhere in the World: Extension of PARMA/EXPACS”, *PLOS ONE*,

10(12): e0144679. (2015)

- [3] T. Sato, H. Yasuda, K. Niita, A. Endo and L. Sihver, "Development of PARMA: PHITS-based Analytical Radiation Model in the Atmosphere" *Radiat. Res.* **170**, 244-259 (2008).
- [4] T. Sato and K. Niita, "Analytical Functions to Predict Cosmic-Ray Neutron Spectra in the Atmosphere", *Radiat. Res.* **166**, 544-555 (2006).
- [5] U.S. Standard Atmosphere, 1976, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1976
- [6] J.M. Picone, A.E. Hedin, D.P. Drob, and A.C. Aikin, "NRL-MSISE-00 Empirical Model of the Atmosphere: Statistical Comparisons and Scientific Issues," *J. Geophys. Res.* **107**, A12, 1468 (2002)
- [7] <http://cosray.unibe.ch/~laurent/magnetocosmics/>
- [8] I.G. Usoskin, K. Mursula, S.K. Solanki, M. Schuessler, and G.A. Kovaltsov, A physical reconstruction of cosmic ray intensity since 1610, *J. Geophys. Res.* **107**(A11), 1374, doi: 10.1029/2002JA009343 (2002)
- [9] NMDB: Real-Time Database for high-resolution Neutron Monitor measurements, <http://www01.nmdb.eu/>
- [10] International Commission on Radiological Protection, *Conversion coefficients for radiological protection quantities for external radiation exposures*. ICRP Publication 116 (2010).
- [11] International Commission on Radiological Protection (2013) *Assessment of Radiation Exposure of Astronauts in Space*. ICRP Publication 123 (2013).
- [12] International Commission on Radiological Protection. *Conversion coefficients for used in radiological protection against external radiation*. ICRP Publication 74 (1996).

Japanese

## EXPACS ver. 2.10

Excel-based Program for calculating Atmospheric Cosmic-ray Spectrum, Copyright© 2006, 日本原子力研究開発機構  
 開発者: 佐藤 達彦, 放射線防護研究グループ, 日本原子力研究開発機構, E-mail: nsed-expacs@jaea.go.jp  
 参考文献: T.Sato and K.Niita, "Analytical Functions to Predict Cosmic-Ray Neutron Spectra in the Atmosphere", Radiat. Res. 166, 544-555 (2006)  
 URL: <http://www.jaea.go.jp/04/nsed/ers/radiation/rpp/EXPACS/expacs.html>

白色のセルに条件を入力して下さい

高度または大気深度: 10 (km)

場所または緯度 (北緯): 35

地磁気強度: 135.45 経度 (東経):

年: 2004

**計算条件の入力欄**

周辺環境: 理想大気中

周辺環境パラメータ: 0.2 入力不要

放射線荷重係数: ICRP60

出力フラックス単位: (/cm2/s/(MeV/n))

出力線量単位: (uSv/h)

入力条件確認

**計算条件の確認欄**

周辺環境パラメータ: 0.2 入力不要

計算結果 被ばく線量率 (uSv/h)

実効線量 H\*(10)

合計線量 1.81E+00 1.66E+00

**計算結果: 被ばく線量率**

中性子 6.4E-01

陽子 3.8E-01

ヘリウム原子核 5.3E-01

μ+粒子 7.6E-02

μ-粒子 5.66E-02 6.32E-02

電子 9.99E-02 2.50E-01

陽電子 8.70E-02 1.66E-01

光子 2.34E-01 6.38E-01

PARMAモデルで計算した大気中宇宙線スペクトル

**計算結果: 宇宙線スペクトル (グラフ)**

PARMAモデルで計算した大気中宇宙線スペクトル

**計算結果: 宇宙線スペクトル (数値データ)**

中性子	6.4E-01
陽子	3.8E-01
ヘリウム原子核	5.3E-01
μ+粒子	7.6E-02
μ-粒子	5.66E-02
電子	9.99E-02
陽電子	8.70E-02
光子	2.34E-01

図1 EXPACS 使用方法に関するまとめ

表1 太陽活動強度 (W-index) の決定に利用した中性子モニタ

Station name	Shorten name	$R_c$ (GV)	Altitude (m)	Operator
Athens	ATHN	8.53	260	National and Kapodistrian University of Athens
Apatity	APTY	0.65	30	Polar Geophysical Institute Russian Academy of Sciences
Fort Smith	FSMT	0.3	180	Bartol Research Institute, University of Delaware
Inuvik	INVK	0.3	21	Bartol Research Institute, University of Delaware
Jungfraujoch	JUNG	4.5	3570	Physikalisches Institut of the University of Bern
Kerguelen	KERG	1.14	33	French Polar Institute and Paris Observatory
McMurdo	MCMU	0.3	345	Bartol Research Institute, University of Delaware
Nain	NAIN	0.3	46	Bartol Research Institute, University of Delaware
Newark	NEWK	2.4	50	Bartol Research Institute, University of Delaware
Oulu	OULU	0.8	15	Sodankyla Geophysical Observatory of the University of Oulu
South Pole	SOPO	0.1	2820	Bartol Research Institute, University of Delaware
Terre Adelie	TERA	0	32	French Polar Institute and Paris Observatory
Thule	THUL	0.3	260	Bartol Research Institute, University of Delaware