宇宙線被ばくの影響

佐藤　達彦（原子力機構）

共同研究者

- ✓ 片岡龍峰（極地研）
- ✓ 塩田大幸（NICT）
- ✓ 久保勇樹（NICT）
- ✓ 石井守（NICT）
- ✓ 保田浩志（広島大学）
- ✓ 三宅晶子（茨城高専）
- ✓ 三好由純（名古屋大学）
- ✓ 上野遥（JAXA）
- ✓ 永松愛子（JAXA)

科研費新学術領域・太陽地球圏環境予測：PSTEP（http://pstep.jp）

発表内容

1. 宇宙線被ばくの概要
2. 太陽静穏時の被ばく線量評価法
   - ✓ 空気シャワーシミュレーション
   - ✓ 計算モデル開発と被ばく線量評価
3. 太陽フレア時の被ばく線量評価法
   - ✓ SEPを観測するためには？
   - ✓ 航空機高度における被ばく線量評価方法
   - ✓ 衛星軌道における被ばく線量評価方法
4. まとめ

質問

大気圏内での宇宙線被ばく線量は，通常，太陽起源と銀河起源，どちらが多い？

1．太陽起源　　2．銀河起源

太陽活動度が高くなると，大気圏内の宇宙放射線強度は？

1．上がる　　2．変わらない　　3．下がる

航空機高度（高度12kmくらい）では，宇宙線被ばく線量は地表面と比べてどれくらい高い？

1．10倍　　2．100倍　　3．1000倍

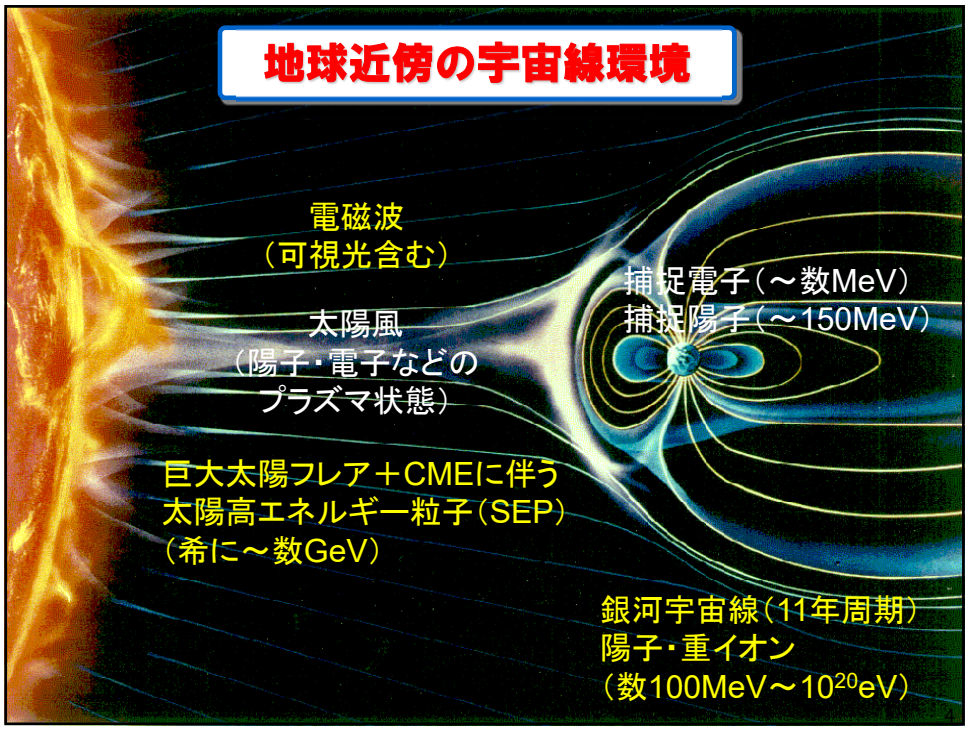
航空機乗務員の被ばく線量が有意に上昇するような太陽フレアの発生頻度は？

1．数ヶ月に1回　2．数年に1回　3．数10年に1回

そのときに支配的に寄与する1次放射線は？

1．陽子　　2．電子　　3．X線

地球近傍の宇宙線環境



宇宙線被ばくの概要

太陽静穏時と大規模フレア時の宇宙線被ばく線量の概算値

被ばく形態	太陽静穏時	大規模フレア時
宇宙飛行士 （船外活動中）	約1 mSv/day 銀河宇宙線（GCR），捕捉陽子，捕捉電子（皮膚と水晶体のみ）	最大 数Sv 陽子(E>2MeV)，電子(E>1MeV) →確定的影響が生じる
宇宙飛行士 （ISS滞在中）	約0.5 mSv/day 銀河宇宙線，捕捉陽子	最大 数100 mSv 陽子(E>100MeV)
航空機搭乗者	約 0.1 mSv/東京・NY往復 銀河宇宙線（主に２次中性子）	最大 数 mSv 陽子(E>100MeV)
公衆 （極域・0km）	約 0.3 mSv/y 銀河宇宙線（主に２次μ粒子）	最大 数 μSv 陽子(E>500MeV)

- ✓ 太陽静穏時：線量限度値を急に超える心配はない → 事後評価
- ✓ 大規模フレア時：線量限度値を急に超える可能性有り → 予測が重要

100MeV以上の太陽高エネルギー粒子(Solar Energetic Particle, SEP)
フラックスをイベント発生からできるだけ早く予測することが重要

法令による航空機乗務員の被ばく管理

国際放射線防護委員会(ICRP)
航空機被ばくは職業被ばくと90年勧告で認定

各国の規制当局
線量管理目標値やその評価指針などを決定

日本では …

- 文部科学省放射線審議会が2006年にガイドラインを策定
  - ✓ 年間線量管理目標値 (5 mSv/year)を設定
  - ✓ 「太陽フレアについては，宇宙天気予報など可能な予測手段なども利用することにより適切な対応を図ること」と明記

航空会社

- 航路線量計算コードを用いて銀河宇宙線による乗務員の年間被ばく線量を評価

  JISCARD（放医研＋原研）

- 太陽フレアについては，2006年以降，巨大イベントなし → We are Lucky!

JAXAが定義した ISS搭乗宇宙飛行士の生涯実効線量制限値

初めて宇宙飛行を行った年齢	男性の制限値	女性の制限値
27～30歳	0.6 Sv	0.5 Sv
31～35歳	0.7 Sv	0.6 Sv
36～40歳	0.8 Sv	0.65 Sv
41～45歳	0.95 Sv	0.75 Sv
46歳以上	1.0 Sv	0.8 Sv

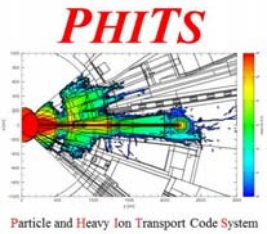
JAXA国際宇宙ステーション搭乗宇宙飛行士被ばく管理規程（2013年6月26日改正）
http://iss.jaxa.jp/med/research/radiation/regulation/

発表内容

1. 宇宙線被ばくの概要
2. 太陽静穏時の被ばく線量評価法
   - ✓ 空気シャワーシミュレーション
   - ✓ 計算モデル開発と被ばく線量評価
3. 太陽フレア時の被ばく線量評価法
   - ✓ SEPを観測するためには？
   - ✓ 航空機高度における被ばく線量評価方法
   - ✓ 衛星軌道における被ばく線量評価方法
4. まとめ

太陽静穏時における被ばく線量評価法

放射線挙動解析
モンテカルロコードPHITS



銀河宇宙線に対する空気シャワーシミュレーション

大気圏内宇宙線スペクトル計算モデルEXPACS

緯度・経度・高度・年月日から宇宙線フラックス導出

航路線量計算プログラム
JISCARD

2空港間の航路線量を自動計算

公衆の宇宙線被ばく線量評価に利用

日本の航空会社による乗務員被ばく線量管理に利用

- ✓ PHITS http://phits.jaea.go.jp/
- ✓ EXPACS http://phits.jaea.go.jp/expacs/
- ✓ JISCARD http://www.jiscard.jp/

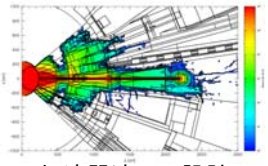
PHITSの概要

Particle and Heavy Ion Transport code System

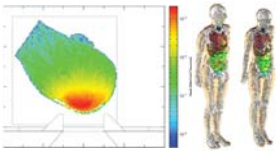
PHITSとは？

任意の体系中における様々な放射線の挙動を、核反応モデルや核データを用いて模擬するモンテカルロ計算コード

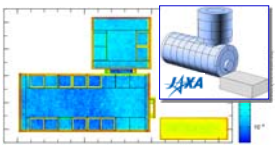
適用例



加速器遮へい設計



放射線防護・治療評価



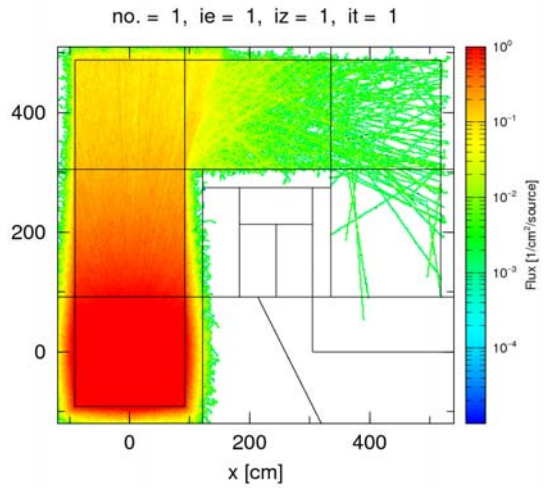
宇宙・地球惑星科学

入手方法

- PHITS講習会に参加する → 全国各地で年10回以上開催（無料）
- RISTの原子力コードセンターに依頼する（国内ユーザー，手数料13,176円）
- OECD/NEA DatabankもしくはRSICCに依頼する（国外ユーザー）

国内外3,000名以上のユーザーが様々な目的で利用

PHITS計算結果の例



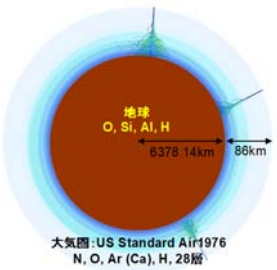
^{137}Cs から放出された100,000個の光子の挙動を模擬

個々の放射線挙動を乱数を用いて模擬することにより，全体的な挙動（平均値）を導出

銀河宇宙線による空気シャワーシミュレーション

シミュレーション条件

- ✓ **太陽圏外（LIS)フラックス**
  DLRモデル: E < 1 TeV, Z ≦ 28 (Ni)
- ✓ **太陽風による減衰**
  Force Field Formalism + 中性子モニタ計数率
- ✓ **地磁気による減衰**
  Vertical cut-off rigidity + 双極子磁場
- ✓ **大気モデル**
  US standard Atmosphere 1976 (~86km)
- ✓ **地球モデル**
  SiO_2, Al_2O_3, H_2O（水分含有量を変化）

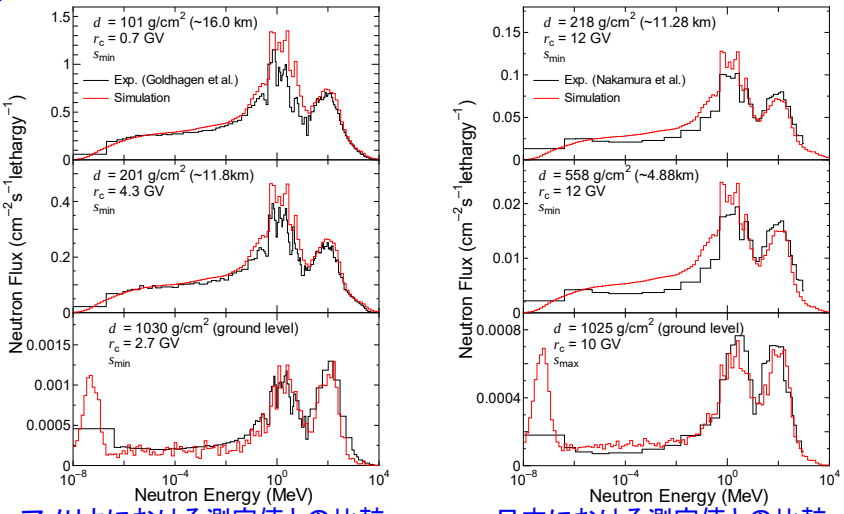


大気＋地球モデル

PHITS

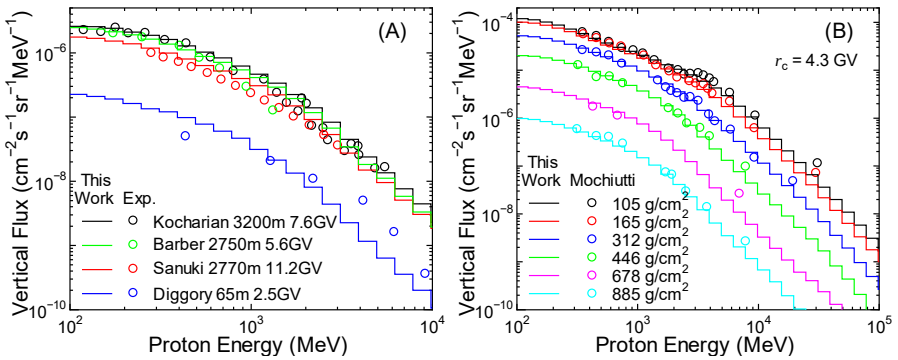
高度・地磁気強度・太陽活動度の関数として
大気圏内の**中性子・陽子・α・$\mu^{\pm}$・γ・$e^{\pm}$**フラックスを計算

計算結果①：中性子フラックス



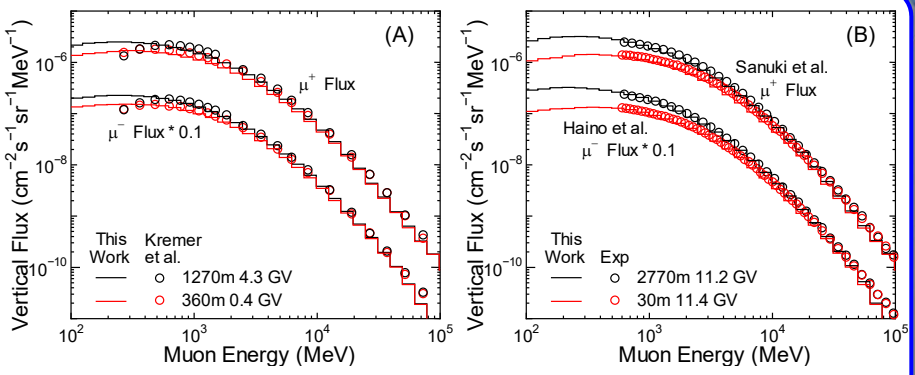
アメリカにおける測定値との比較　　日本における測定値との比較

計算結果②：陽子フラックス



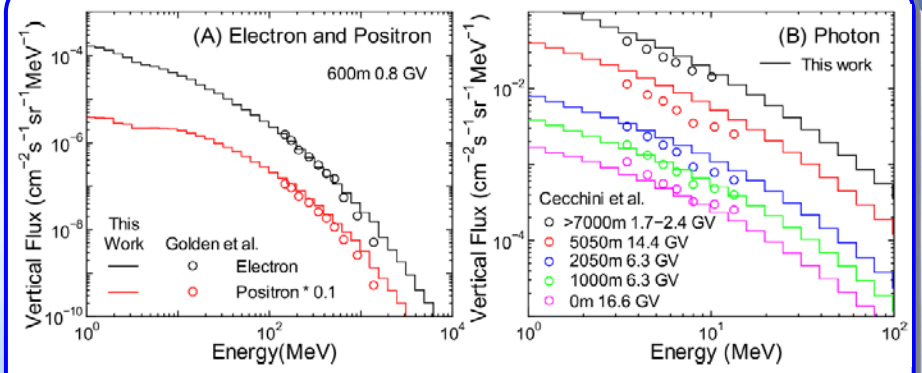
世界各地（左）及び気球を使って測定した陽子フラックス（垂直方向）との比較

計算結果③：ミューオンフラックス



CAPRICE（左）及びBESS（右）実験で測定した
ミューオンフラックス（垂直方向）との比較

計算結果④：電子，陽電子，光子フラックス



大気中の電子・陽電子(左）及び光子（右）フラックス

発表内容

1. 宇宙線被ばくの概要
2. 太陽静穏時の被ばく線量評価法
   - ✓ 空気シャワーシミュレーション
   - ✓ 計算モデル開発と被ばく線量評価
3. 太陽フレア時の被ばく線量評価法
   - ✓ SEPを観測するためには？
   - ✓ 航空機高度における被ばく線量評価方法
   - ✓ 衛星軌道における被ばく線量評価方法
4. まとめ

大気圏内宇宙線スペクトル迅速計算モデルPARMA

PHITS-based Analytical Radiation Model in the Atmosphere

導出方法

- 高度： 0～64kmまで28条件
- 地磁気強度： Vertical Cut-off Rigidity 0～20 GVまで21条件
- 太陽活動度： W index (～黒点数) 0～200まで5条件
- 放射線の種類：中性子・陽子・イオン（～Ni）・$\mu^{\pm}$・$e^{\pm}$・光子の34種類

合計28×21×5×34＝99,960条件に対する宇宙線スペクトルの系統性を解析

大気圏内宇宙線スペクトルを関数化

関数系（例）

$$\overline{\phi_B}(E) = c_1\left(\frac{E}{c_2}\right)^{c_3}\exp\left(\frac{-E}{c_2}\right) + c_4\exp\left\{\frac{-[\log_{10}(E)-\log_{10}(c_5)]^2}{2[\log_{10}(c_6)]^2}\right\} + c_7\log_{10}\left(\frac{E}{c_8}\right)\left\{1+\tanh\left[c_9\log_{10}\left(\frac{E}{c_{10}}\right)\right]\right\}\left\{1-\tanh\left[c_{11}\log_{10}\left(\frac{E}{c_{12}}\right)\right]\right\}$$

$$\log_{10}[f_G(E,w)] = g_1 + g_2\log_{10}\left[\frac{E}{g_3(w)}\right]\left\{1-\tanh\left\{g_4\log_{10}\left[\frac{E}{g_5(w)}\right]\right\}\right\}$$

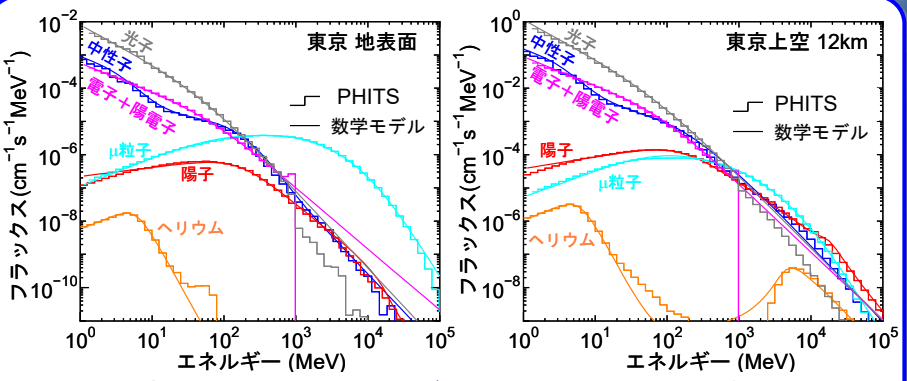
フリーパラメータ：モンテカルロ計算結果を最小自乗フィッティングして決定

大気中任意地点・時間*における宇宙線スペクトルを高精度かつ迅速に計算可能

*太陽フレア時を除く

T. Sato PLOS ONE 10(12): e0144679 (2015), T. Sato PLOS ONE 11(8): e0160390

PHITSと数学モデルによる結果の比較

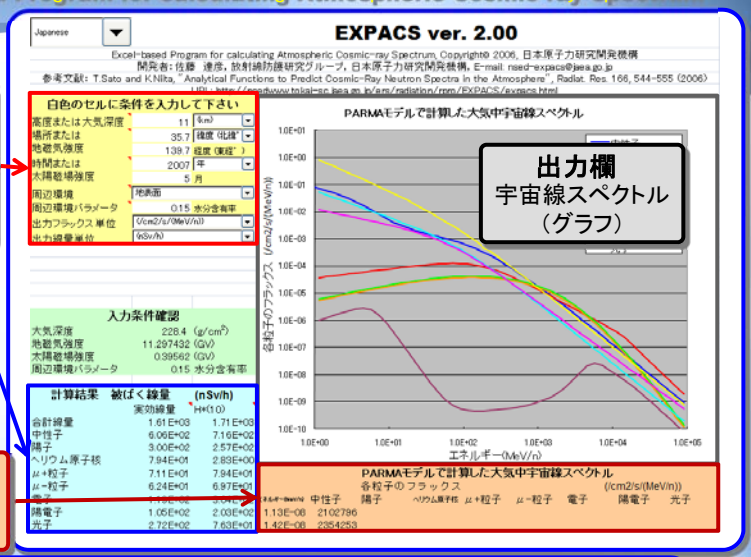


太陽活動極小期の東京地表面及び上空12kmにおける宇宙線スペクトル

大気圏内の任意の場所・時間における宇宙線強度を
モンテカルロ計算と同等の精度で迅速に計算可能とした

EXPACSの開発

EXcel-based Program for calculating Atmospheric Cosmic-ray Spectrum



入力欄
- 高度
- 緯度・経度
- 年月
- 周辺環境

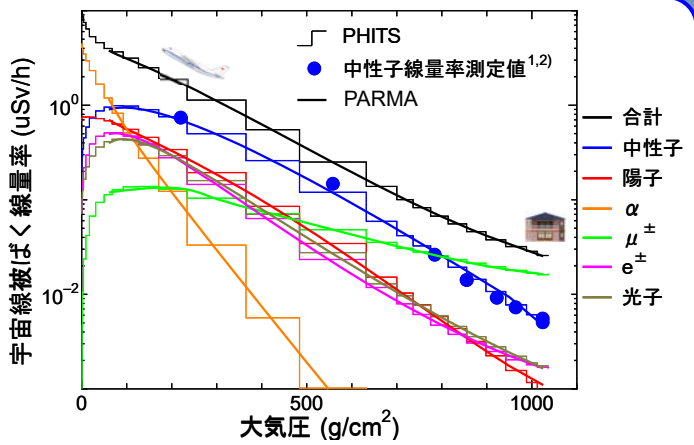
出力欄
各放射線別の
被ばく線量率

出力欄
宇宙線スペクトル
（数値データ）

Web上で一般公開

Google G EXPACS 検索

大気圏内宇宙線被ばく線量の高度依存性

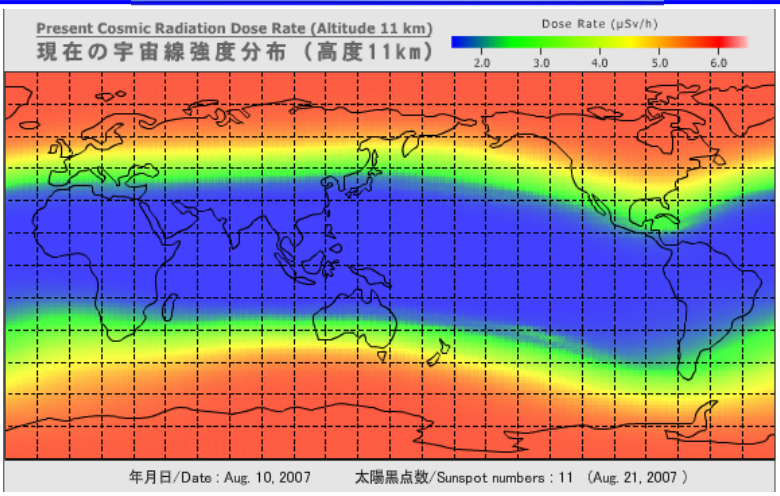


東京上空における宇宙線被ばく線量率の高度依存性

航空機高度では地表面の約100倍の宇宙線被ばく線量
地表面では，μ粒子による寄与が支配的

1) T. Nakamura et al., (2005) 2) M. Kowatari et al., (2005)

地域（地磁気強度）依存性

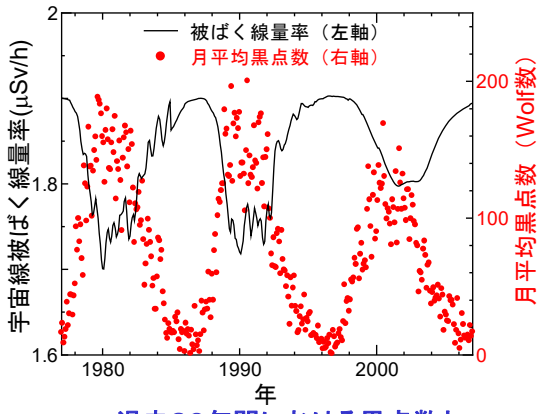


高度11kmにおける現在の宇宙線被ばく線量率地図（from JISCARD[1)] ）

（各地点における地磁気強度はMAGNETOCOSMIC[2)]より計算）

1) http://www.nirs.go.jp/research/jiscard/index.shtml
2) http://reat.space.qinetiq.com/septimess/magcos/

時間（太陽活動周期）依存性

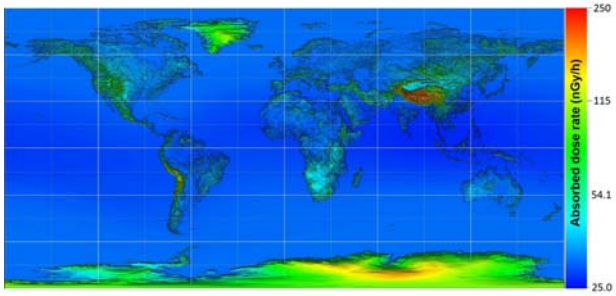


過去30年間における黒点数と
東京上空高度11kmにおける宇宙線被ばく線量率の時間変化

黒点数と宇宙線被ばく線量率は負の相関関係 → 数ヶ月程度の位相差がある

現在の宇宙線被ばく線量率は数ヶ月前の太陽活動強度に影響を受ける

公衆・航空機乗務員の年間宇宙線被ばく線量



地表面における宇宙線被ばく線量率

標高が高い方が高い

極域の方が高い

国・地域別の公衆年間宇宙線被ばく線量

順位	国名	(mSv/年)
1	[redacted]	0.81
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]

世界平均は0.32mSvで
従来の想定より16%低い

日本航空機乗務員の年間被ばく線量

	平均値 (mSv/年)	最大値 (mSv/年)
パイロット	1.68	2.79
客室乗[illegible]	[illegible]	[illegible]

管理目標値5mSv/年
を下回ることを確認

T. Sato, *Sci. Rep.* **6**, 33932 (2016)

保田　Isotope News, 2009年7月号

発表内容

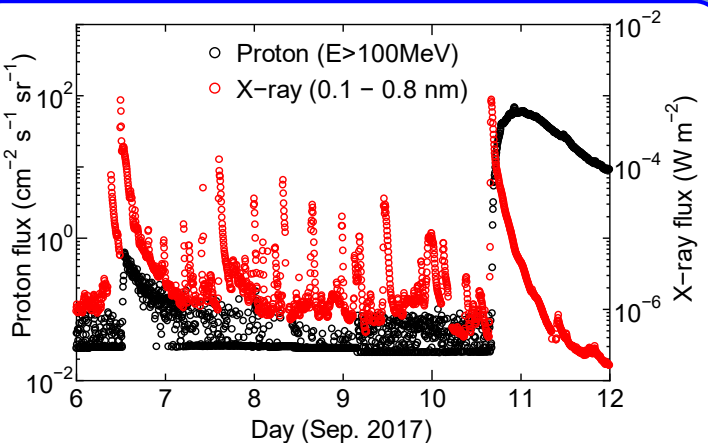
1. 宇宙線被ばくの概要
2. 太陽静穏時の被ばく線量評価法
   - ✓ 空気シャワーシミュレーション
   - ✓ 計算モデル開発と被ばく線量評価
3. 太陽フレア時の被ばく線量評価法
   - ✓ SEPを観測するためには？
   - ✓ 航空機高度における被ばく線量評価方法
   - ✓ 衛星軌道における被ばく線量評価方法
4. まとめ

SEPを観測するには？　①太陽観測

「ひので」によるX線観測（国立天文台/JAXA/MSU）

- ✓ 太陽観測で見えるのは可視光やX線など
- ✓ SEP（高エネルギー陽子）を直接捉えることはできない

SEPを観測するには？　②衛星観測



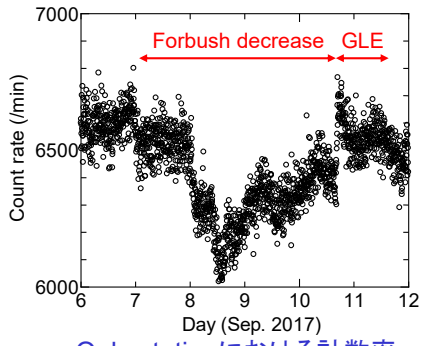
GOES衛星で測定した陽子及びX線フラックス

- ✓ X線と陽子フラックスの時間変動は必ずしも一致しない
- ✓ 被ばく評価で重要となる高エネルギーSEPの観測精度は高くない

SEPを観測するには？　③地上観測

大気圏内で発生する2次中性子を
計測するモニタが世界各地に整備

http://www.nmdb.eu/



Oulu stationにおける計数率

http://cosmicrays.oulu.fi/

- ✓ GOESでSEP増加が観測されても地上には影響がない場合が多い
- ✓ むしろ，Furbush decreaseにより被ばく線量は下がる
- ✓ 極めて大量のSEPが来た場合のみ中性子モニタ計数率が上がる
  → Ground Level Enhancement (GLE) 発生

SEPを観測するには？　④線量モニタ

航空機には線量モニタは常時搭載されていない

地上では原子炉などの周辺で線量が常時モニタリングされている

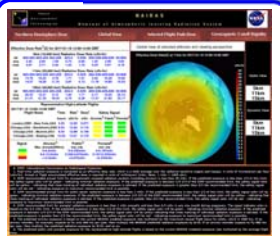
- ✓ 航空機を用いた被ばく線量計測実験結果はいくつかあるが，SEPにより被ばく線量が上昇した結果は数例しかない
- ✓ 原子炉等で使用される放射線モニタは，感度が低いためバックグランドの微妙な変動を計測することはできない

航空機高度における被ばく線量はモデルにより推定する必要がある

発表内容

1. 宇宙線被ばくの概要
2. 太陽静穏時の被ばく線量評価法
   - ✓ 空気シャワーシミュレーション
   - ✓ 計算モデル開発と被ばく線量評価
3. 太陽フレア時の被ばく線量評価法
   - ✓ SEPを観測するためには？
   - ✓ 航空機高度における被ばく線量評価方法
   - ✓ 衛星軌道における被ばく線量評価方法
4. まとめ

各国のSEP被ばく評価コードの比較



NAIRAS

AVIDOS

WASAVIES

	NAIRAS	AVIDOS	WASAVIES
開発機関	NASA	ESA (Seibersdorf Laboratories)	All Japan (NIPR, NICT, JAEA, Nagoya U. etc.)
入射フラックス	GOES	GOES	中性子モニタ＋GOES
空気シャワー	決定論的モデル（HZETRN）	モンテカルロ（FLUKA）	モンテカルロ（PHITS）
Now- or Forecast	Nowcast	Nowcast	Nowcast + Forecast
自動計算システム	あり	あり	なし

WASAVIESの特徴

従来モデル

✓ GOES陽子データから航空機高度の被ばく線量を推定

✓ 中性子モニタ計数率から航空機高度の被ばく線量を推定

1つのデータからモデルを使って外挿するイメージ

PSTEPで開発中のモデル

✓ GOES陽子データと中性子モニタ計数率の両方から航空機高度の被ばく線量を推定（内挿）

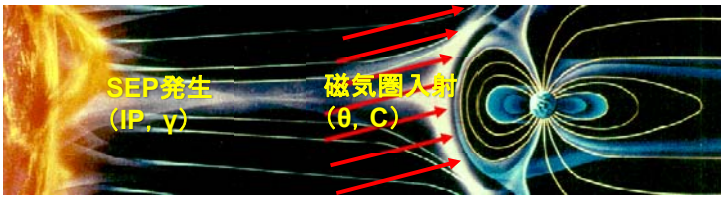
2つのデータからモデルを使って内挿するイメージ

✓ GLEの初期段階は現況推定，ピークを過ぎれば予測も可能

物理モデル*をベースとしているため

*Kataoka et al. Space Weather (2014), Kubo et al. EPS (2015)

SEP被ばくを特徴付ける４つのパラメータ

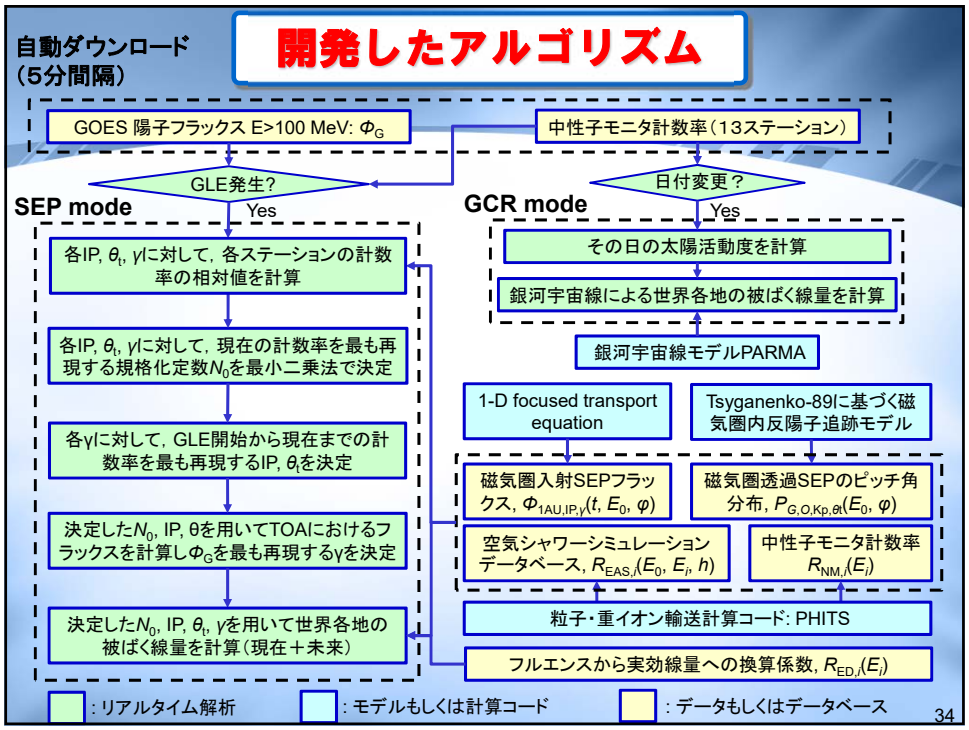


SEPが入射角θで磁気圏に突入してくると仮定（θ_t=0だと軌道面に並行）

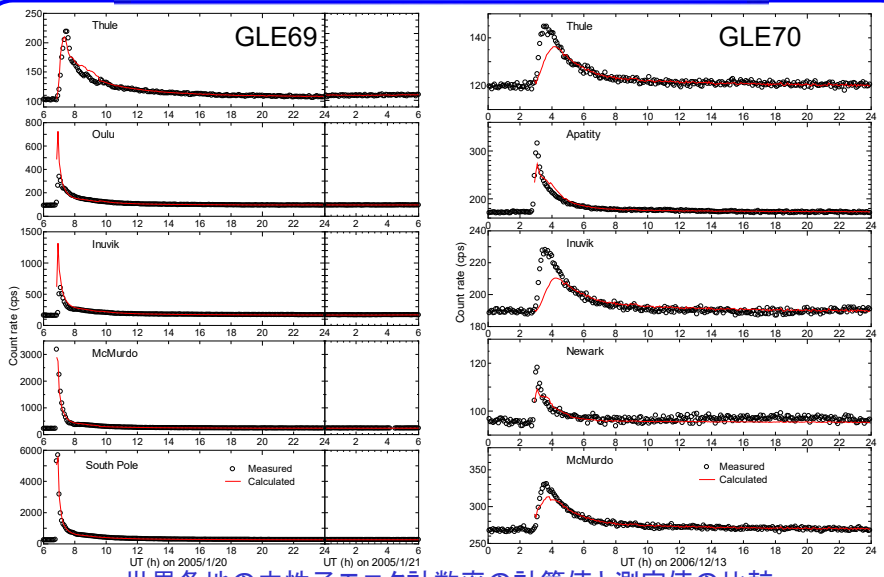
- 太陽近傍でのSEP加速の時間構造（Injection Profile，IP）
- 太陽近傍でのSEPのべき（γ）
- 磁気圏への南北方向に対する入射角度（θ_t）
- 磁気圏に入射するSEPフラックスの絶対値（N_0）

これらのパラメータをGOESと中性子モニタ計数率から決定

開発したアルゴリズム

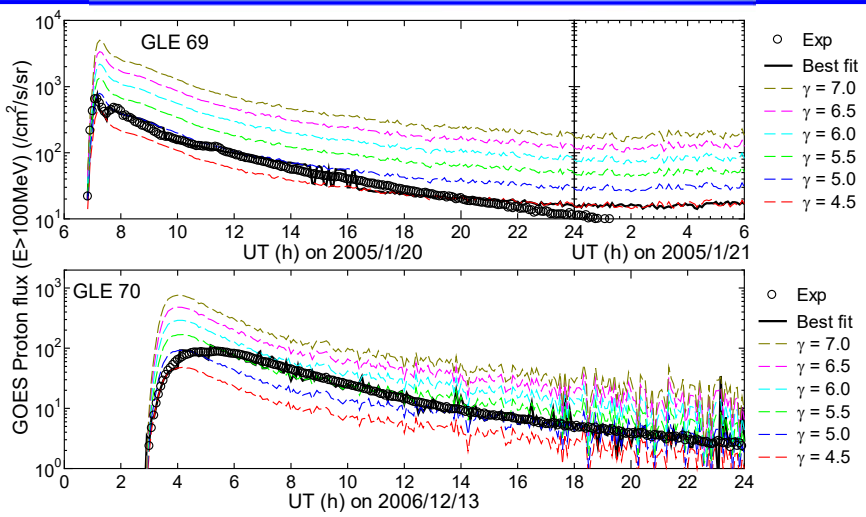


中性子モニタ計数率の再現性



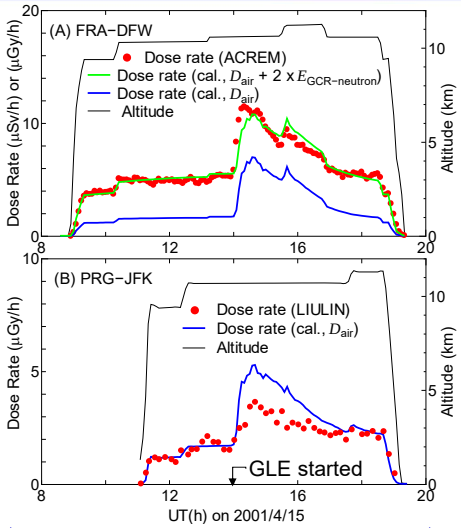
世界各地の中性子モニタ計数率の計算値と測定値の比較

GOES陽子フラックスの再現性



GOES陽子フラックス（衛星軌道）＆中性子モニタ（地上），ともによく再現
→ 航空機高度における計算精度を保証

航空機実験結果の再現性



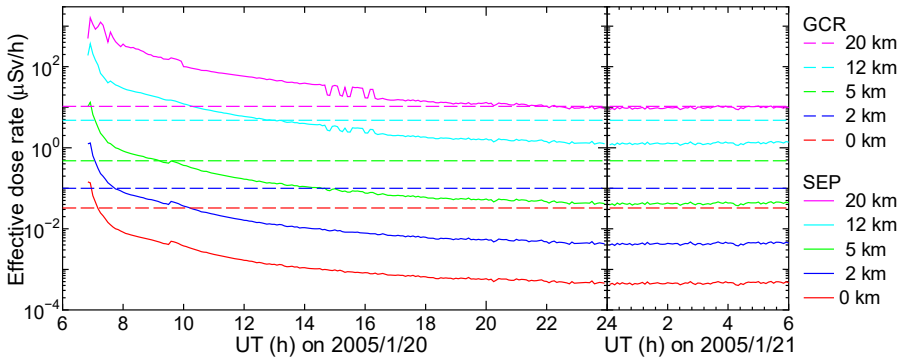
Bartlett et al. (2002)

Spurny and Dachev (2002)

GLE60時の2航路(Frankfurt−Dallas & Prague−New York)における被ばく線量

測定値を驚くほどよく再現！

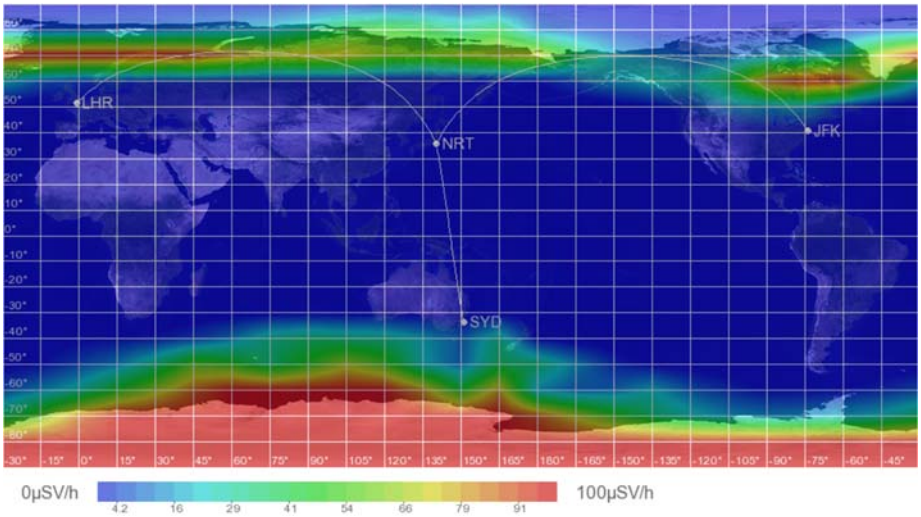
航空機高度の被ばく線量（GLE69）



GLE69時のGCR及びSEPによる最大被ばく線量の時間変化（Nowcast）

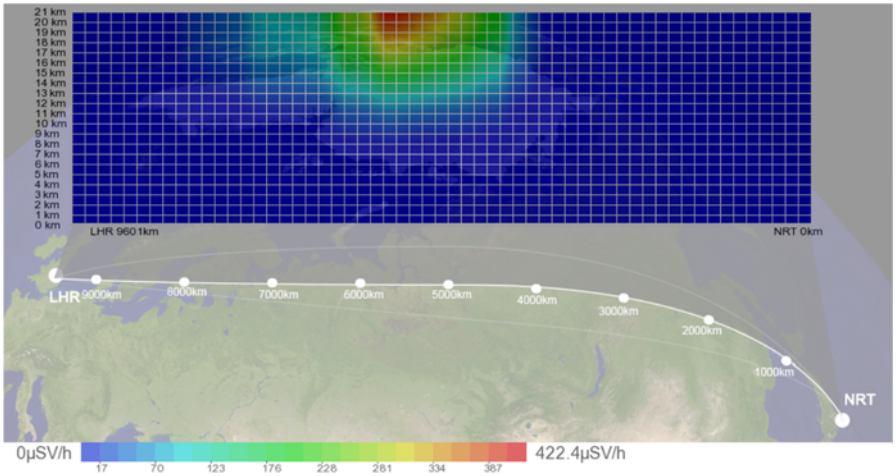
- ✓ 航空機高度（12km）におけるSEP瞬間最大線量は400μSv/h
- ✓ 航空機高度（12km）におけるSEP積算最大線量は200μSv程度
  → 通常の東京−ニューヨーク往復の2倍程度

航空機高度宇宙線被ばく線量マップ



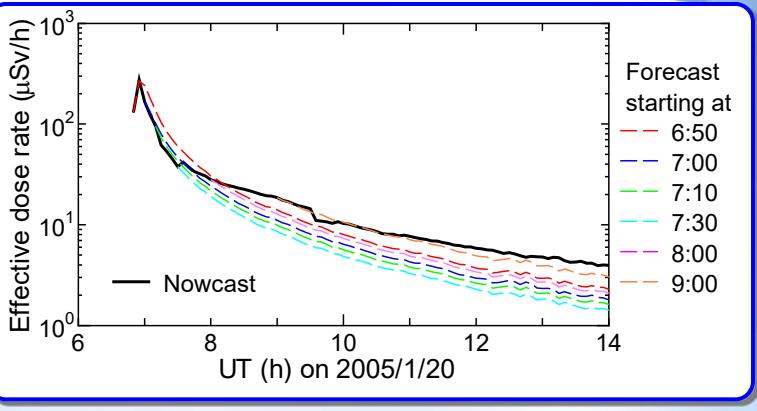
GLE69ピーク時（2005/1/20 UT18:00）の高度12kmにおける被ばく線量

特定航路上の宇宙線被ばく線量マップ



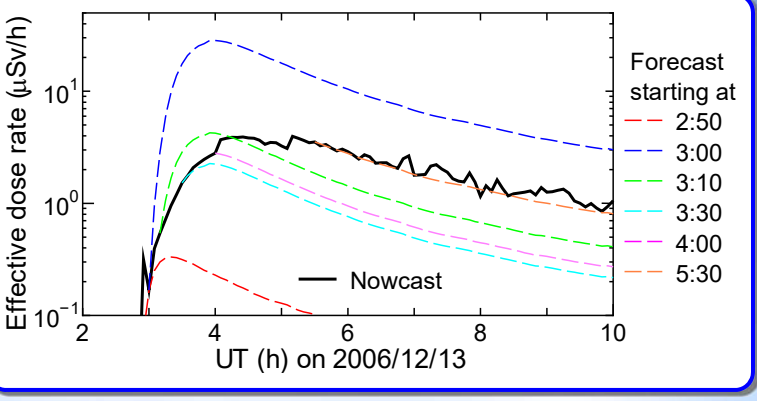
GLE69ピーク時（2005/1/20 UT18:00）の東京・ロンドン標準的な航路上における被ばく線量率

航空機高度の被ばく線量（GLE69）（Forecast）



- ✓ Start timeまでの情報を使って，その後の時間変化を予測した結果
- ✓ Forecast ≒ Nowcast → 物理モデルの正しさを証明

航空機高度の被ばく線量（GLE70）（Forecast）



- ✓ 時間と共に最適なγ（スペクトルのベキ）が変化するため，Nowcastデータを再現していない → 物理モデル改良の必要性を示唆

発表内容

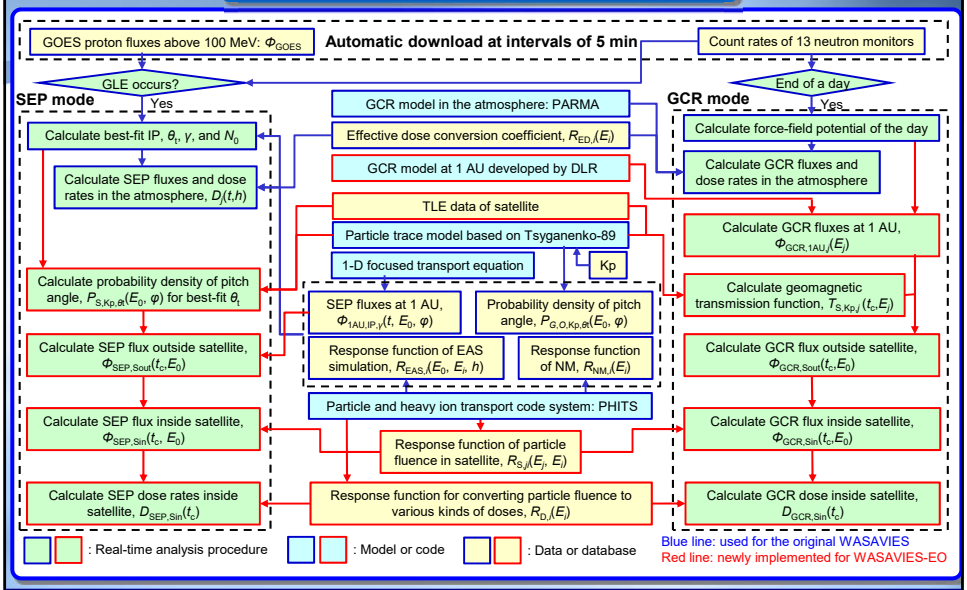
1. 宇宙線被ばくの概要
2. 太陽静穏時の被ばく線量評価法
   - ✓ 空気シャワーシミュレーション
   - ✓ 計算モデル開発と被ばく線量評価
3. 太陽フレア時の被ばく線量評価法
   - ✓ SEPを観測するためには？
   - ✓ 航空機高度における被ばく線量評価方法
   - ✓ 衛星軌道における被ばく線量評価方法
4. まとめ

太陽高エネルギー粒子（SEP）宇宙空間で引き起こす問題

- ✓ 宇宙飛行士の放射線被ばく
- ✓ シングルイベントアップセットによる衛星搭載機器の誤作動

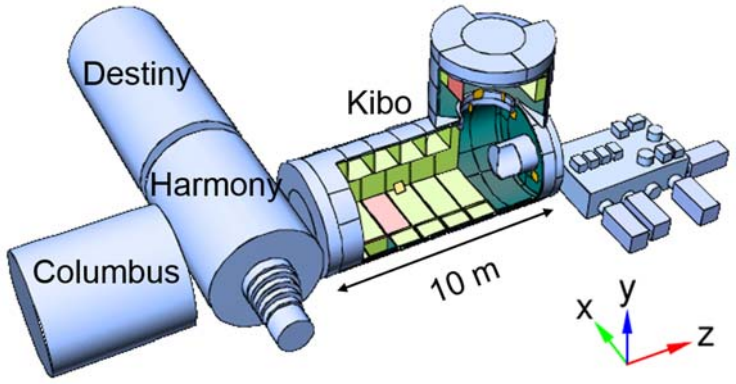
- ✓ 様々な衛星軌道におけるSEPフラックスの現況が分かれば運用に役立つ
- ✓ 予報ができれば，なお素晴らしい

拡張したアルゴリズム



通常のWASAVIES解析が完了した後，衛星軌道データを使って地球軌道モードの解析を開始

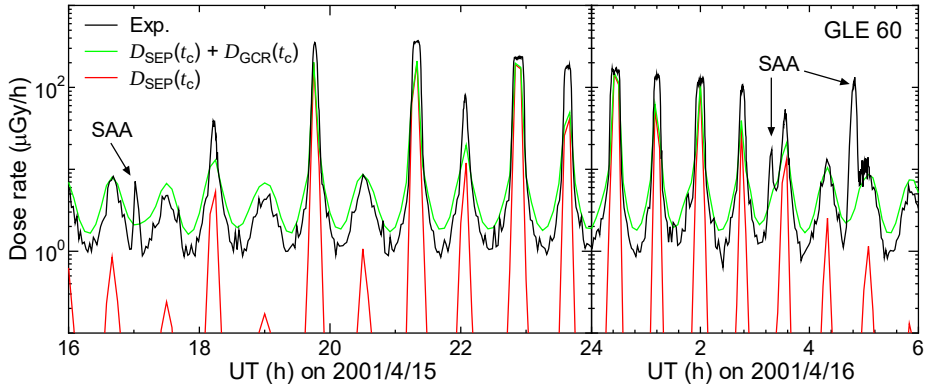
Virtual ISS



永松さん（JAXA）らが中心となって開発したVirtual ISSモデル

- ✓ きぼうモジュール内はラックの構造まで反映
- ✓ それ以外のモジュールは重さのみ調整
- ✓ 与圧部など様々な場所における応答関数をPHITSで計算

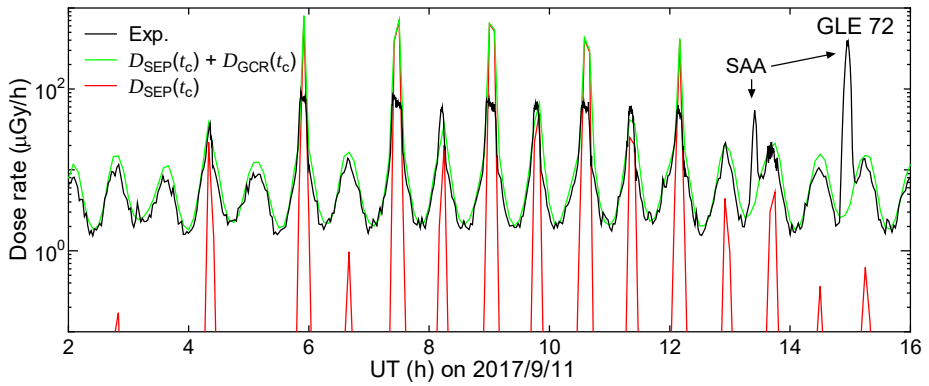
精度検証①



GLE60時にISS US Laboratoryに搭載したSi線量計（DOSTEL）測定結果との比較

- ✓ GCR成分はほぼ完璧に再現
- ✓ SEP成分はやや過小評価するもののよく再現
- ✓ 捕捉陽子（SAA）に関してはモデルで考慮していないので再現できない

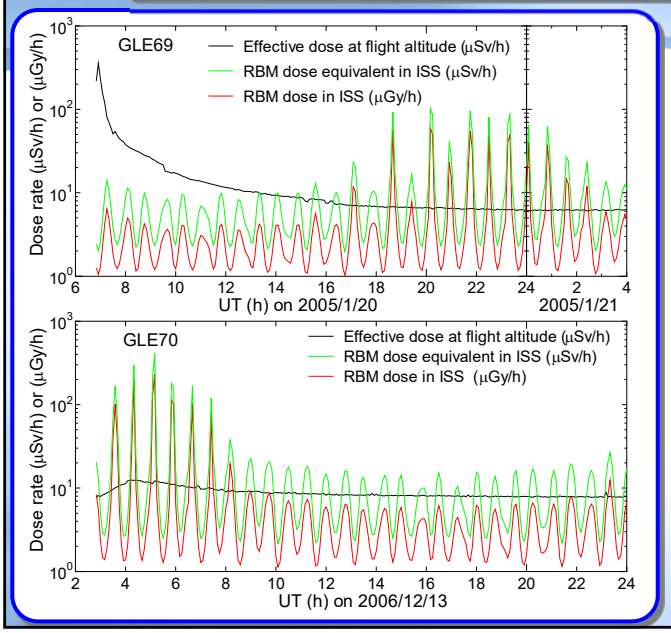
精度検証②



GLE72時にISS Columbus Moduleに搭載したSi線量計（DOSTEL）測定結果との比較

- ✓ SEP線量を過大評価
- ✓ 低エネルギー（E>80MeV）の単純外挿に起因？
- ✓ それとも遮蔽厚の違い？

被ばく線量評価結果：Nowcast

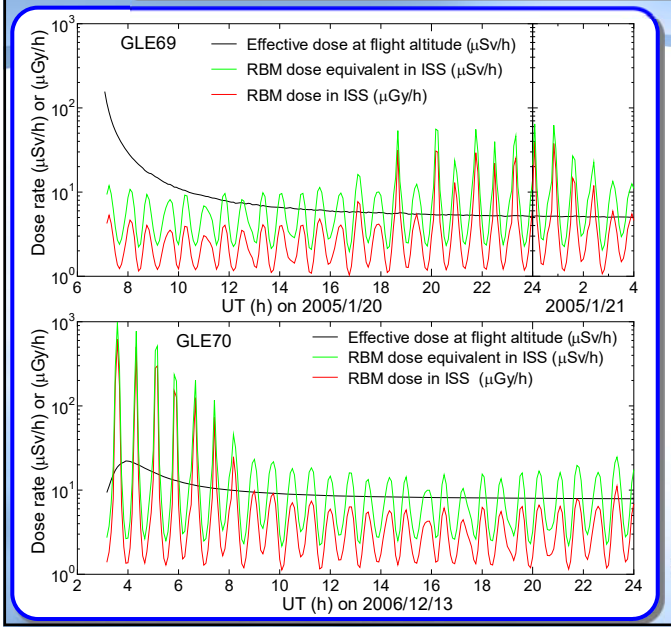


GLE69及びGLE70時における航空機高度（南極上空）とISSきぼうモジュール内の被ばく線量率

全被ばく線量はGLEピーク時のISS軌道に大きく依存する

- ✓ GLE69は回避
- ✓ GLE70は直撃

被ばく線量評価結果：Forecast



GLE69及びGLE70時における航空機高度（南極上空）とISSきぼうモジュール内の被ばく線量率（GLE検出20分後から予測開始）

絶対値はファクターでずれるものの，線量が上がるタイミングは予想できるため，被ばく対策に役立つ

発表内容

1. 宇宙線被ばくの概要
2. 太陽静穏時の被ばく線量評価法
   - ✓ 空気シャワーシミュレーション
   - ✓ 計算モデル開発と被ばく線量評価
3. 太陽フレア時の被ばく線量評価法
   - ✓ SEPを観測するためには？
   - ✓ 航空機高度における被ばく線量評価方法
   - ✓ 衛星軌道における被ばく線量評価方法
4. まとめ

まとめ

- ✓ 宇宙線被ばく線量評価は，太陽物理，宇宙天気，原子核物理，保健物理など様々な研究分野の知見を統合して初めて可能となる
- ✓ 太陽静穏時のモデルは既に完成し，航空機乗務員被ばく線量管理や公衆の宇宙線被ばく線量評価など様々な目的で応用されている
- ✓ 太陽フレア時のモデルは，現在，リアルタイムで情報を発信するWebシステムを開発中で，今年度中にNICT宇宙天気情報センターのサービスの一環として公開予定

あとはフレアが発生するのを待つのみ！

関連論文

✓ PARMA/EXPACSの開発
- T. Sato, PLOS ONE 10(12): e0144679 (2015)
- T. Sato, PLOS ONE 11(8): e0160390 (2016)

✓ PARMAを用いた公衆の被ばく線量評価
- T. Sato, Sci. Rep. 6: 33932 (2016)

✓ WASAVIESモデル開発
- R. Kataoka et al. Space Weather 12, 380-386 (2014)
- T. Sato et al. Space Weather 16, 924-936 (2018)

✓ WASAVIESによる2017年9月イベント解析結果
- R. Kataoka et al. Space Weather 16, 917-923 (2018)