

ハイマツ・マツ試料を用いた 放射性炭素(^{14}C)濃度測定

○武山 美麗^{1,2}, 森谷 透^{1,2}, 櫻井 敬久², 門叶 冬樹^{1,2},
塔 隆志³

¹山形大学高感度加速器質量分析センター,

²山形大学理学部, ³東京大学宇宙線研究所

「乗鞍高度における宇宙線生成核種濃度の観測」

研究代表者：山形大学理学部 門叶冬樹

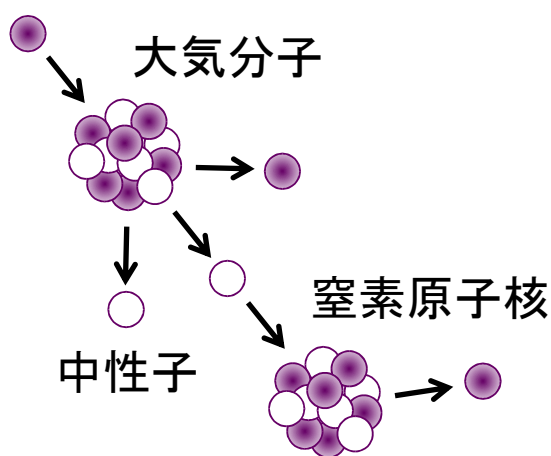
2025年度査定額 旅費：100千円

使用内訳：乗鞍観測所でのサンプリングのための旅費

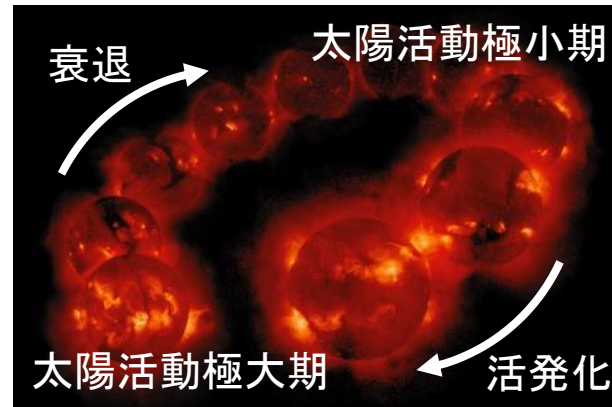
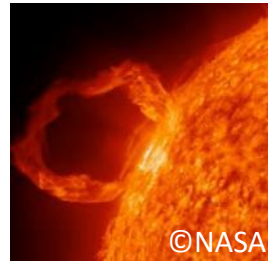
ご支援ありがとうございます

古木年輪試料を用いた過去の宇宙線強度変動の研究

高エネルギー
宇宙線(陽子)



太陽フレア



超新星爆発



ガンマ線バースト



二酸化炭素 ($^{14}\text{CO}_2$) として循環し
光合成により年輪に取り込まれる



古木試料の1年輪ごとの
 ^{14}C 濃度を測定

地球規模の炭素循環の
影響を受ける

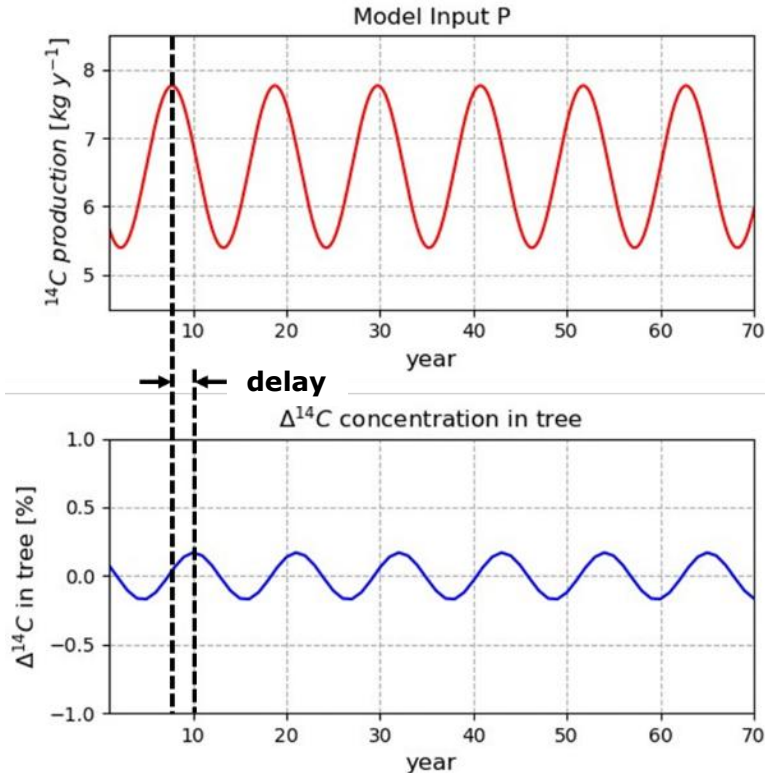
過去の宇宙線増加現象を探索(名古屋大 三宅先生)

F. Miyake et al., Nature. 486, 240-242 (2012), F. Miyake et al., Front. Astron. Space Sci. 9, 886140 (2022)

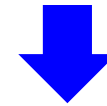
過去の太陽活動を復元(沖縄科学技術大学院大 宮原先生)

H. Miyahara et al., Sci. Rep. 11, 5482 (2021), H. Miyahara et al., Geophys. Res. Lett., 49, e2021GL097201 (2022)

炭素循環による ^{14}C 濃度の減衰



太陽活動のシュワーベサイクルの影響を受け、11年の周期で $\pm 20\%$ 変調する ^{14}C 量を22ボックスモデル(Brehm et al., 2021)に入力



樹木年輪中の ^{14}C 濃度変動は地球環境の炭素循環により $\pm 0.2\%$ まで減衰し、位相も2~3年遅れる

太陽黒点数や二次宇宙線の量が観測されている**現生の試料中の ^{14}C 濃度を精度良く測定**することで、炭素循環モデルを評価できる
 \Rightarrow 古木試料中の ^{14}C 濃度変動と過去の宇宙線増加現象の探索および太陽活動の復元への理解が深まると期待される

現生試料の選択



<https://www.yamakei-online.com/yama-ya/detail.php?id=3454>

ハイマツの球果および葉試料

- 人間活動の影響を受けにくいと期待される**森林限界に生育する高山植物(ハイマツ)**をターゲット
- 単年性の試料で一年の時間分解能で測定可能
- 比較のために市街地のアカマツを測定



排気ガス
の影響

	ハイマツ	アカマツ
球果	長さ3~6 cm 種子が大きい (~10 mm)	長さ4~6 cm 種子が小さい (~4 mm)
葉	5本葉で短い (~40 mm)	2本葉で長い (~120 mm)

⇒2018年から1年毎に試料を採取

ハイマツ・マツ球果の種子

乾燥後、種子を採取



ハイマツ球果
の断面図



斎藤新一郎「木と動物の森づくり」
p.159

種子の写真



<https://ja.wikipedia.org/>

- $\Delta^{14}\text{C}$ 値の測定にはハイマツ・マツ試料の球果から種子を採取して使用
- 種子の中の実(白い部分)は前処理で溶けるため、外種皮を測定

ハイマツ・マツ試料の採取地点

乗鞍岳



高度 2778 m

40°N

蔵王山



高度 1667 m

30°N

130°E

140°E

天童市



高度 111 m

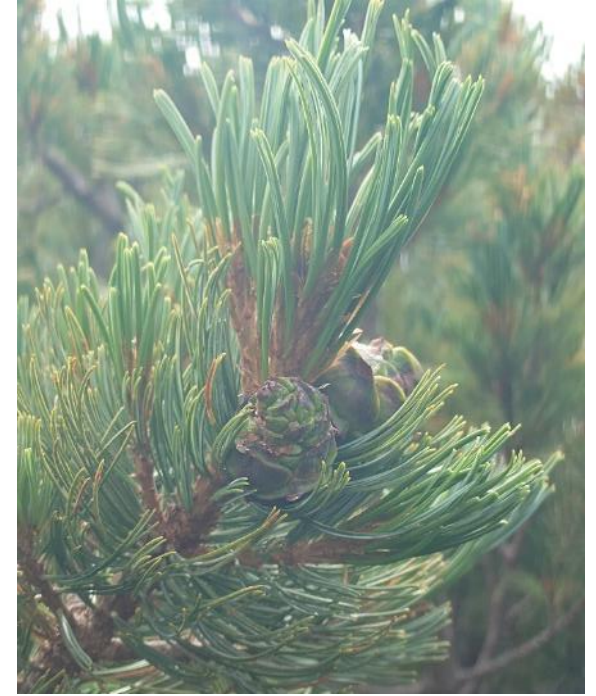
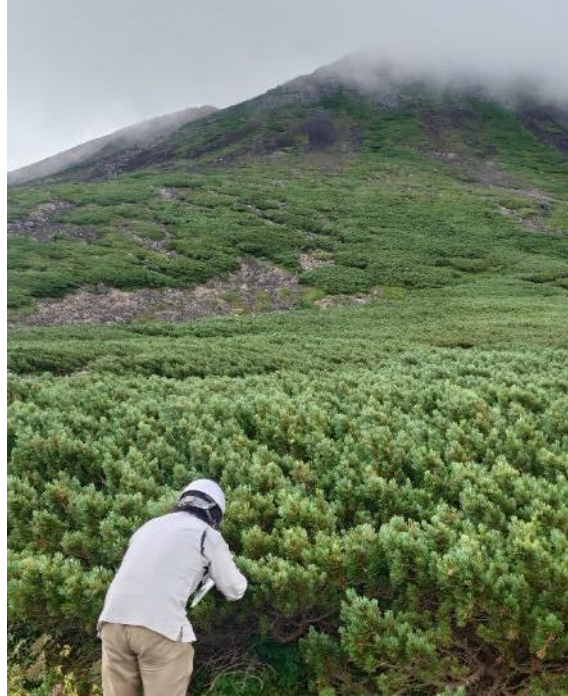
板橋区



高度 31 m



乗鞍岳におけるハイマツの採取



環中中国許第2505233号
令和7年5月23日

山形大学小白川キャンパス長
大西 彰正 殿

中部地方環境事務所長
小森 繁

自然公園法（昭和32年法律第161号）第21条第3項の規定に基づき、貴殿の次の申請に係る行為を許可する。

国立公園名 中部山岳国立公園

様式第79号

門叶 冬樹 殿	7飛管第 270号 令和7年 6月24日
	飛騨森林管理署長
高山植物等採取許可証	
令和7年6月3日付で申請のあった高山植物等の採取について下記のとおり許可します。	
記	
1 採取者氏名 門叶 冬樹	
2 採取期間 自 令和7年8月1日 至 令和7年10月31日	
3 採取場所 岐阜県高山市丹生川町岩井谷 乗鞍国有林120二林小班	

環境省および森林管理局の許可を得て、ハイマツの球果と葉を採取

乗鞍岳で採取したハイマツの写真 (採取日: 2025/8/18)

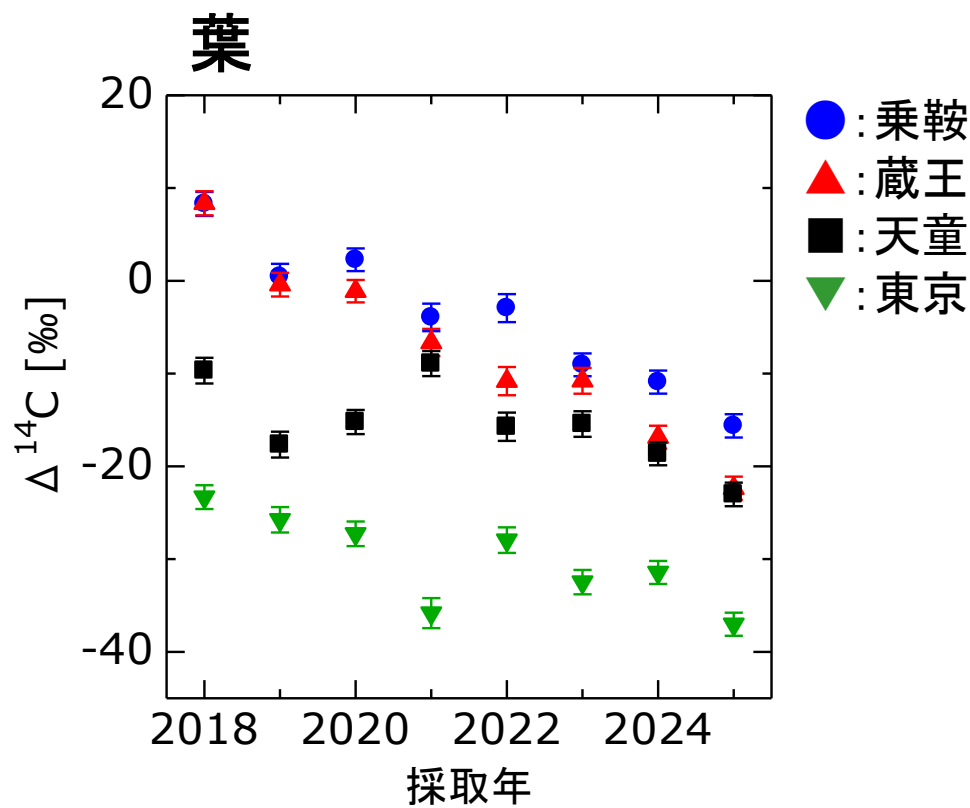
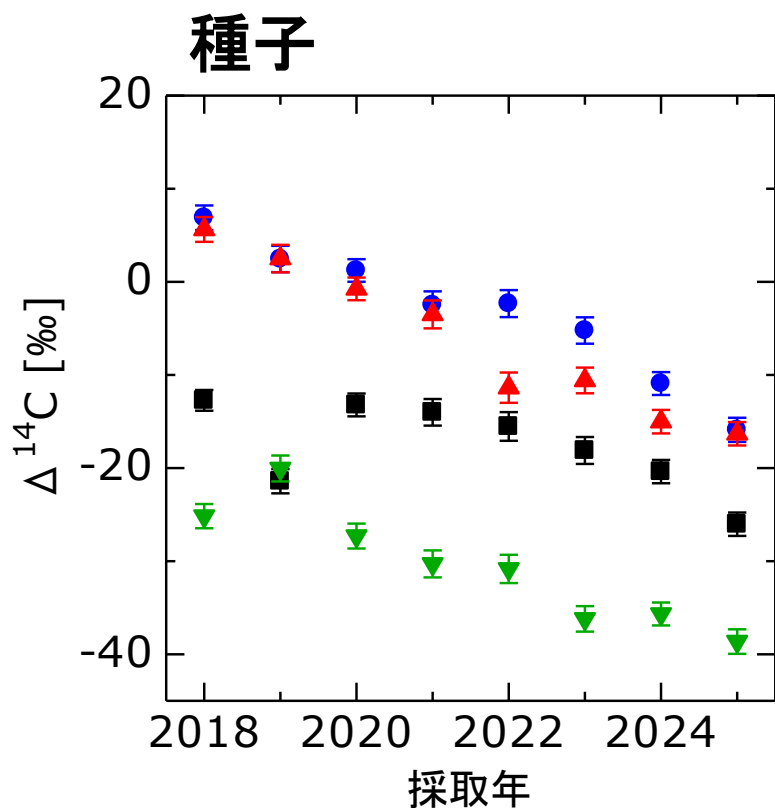
球果



葉

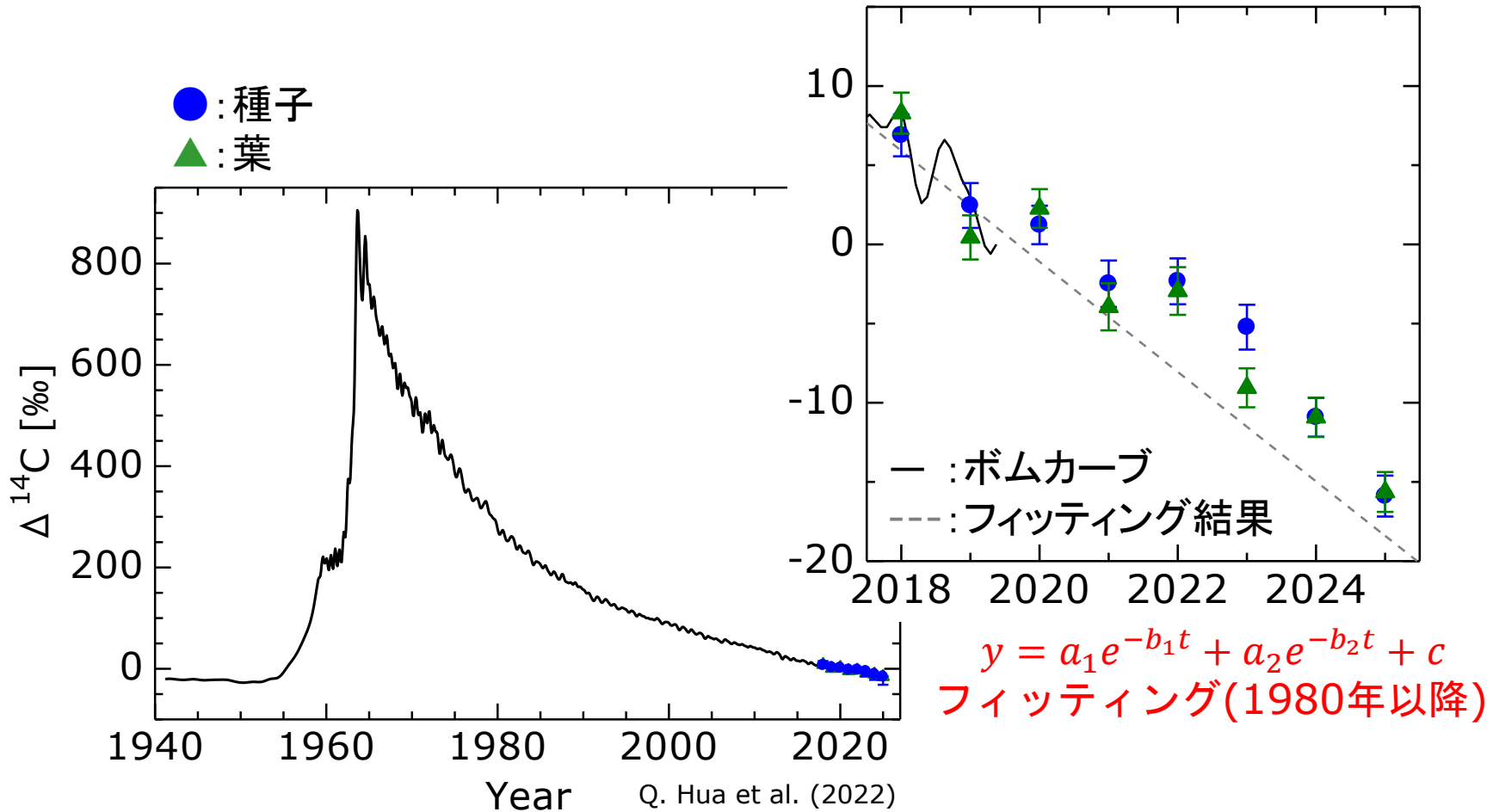


ハイマツ・マツの種子と葉の $\Delta^{14}\text{C}$ 値



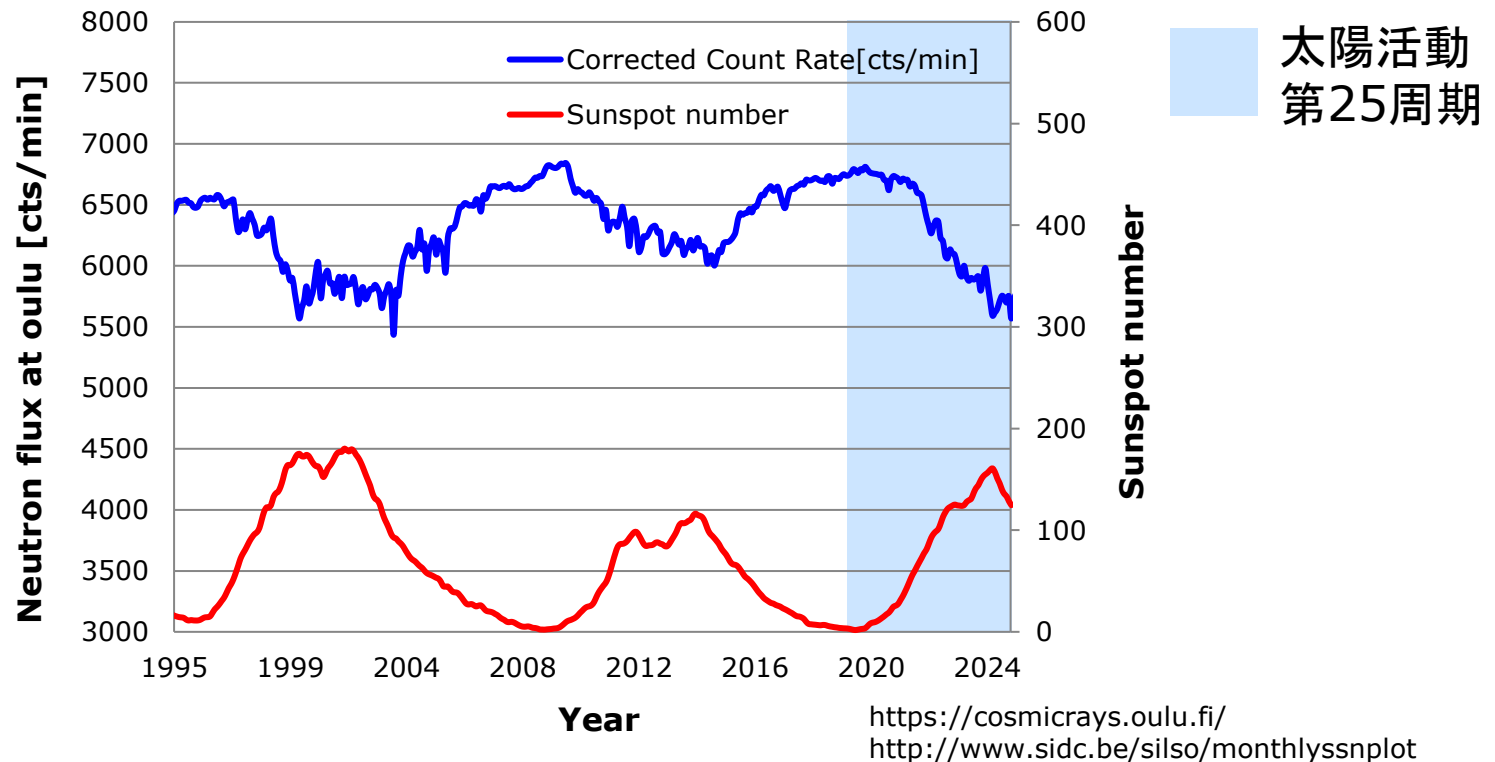
- 山地(乗鞍・蔵王)での $\Delta^{14}\text{C}$ 値は2018年から2025年にかけて減少傾向を示した
- 平地(天童・東京)での $\Delta^{14}\text{C}$ 値は山地と比較してどの年も低い値を示した

^{14}C のボムカーブと乗鞍試料の $\Delta^{14}\text{C}$ 値



現在、核実験以前に近い値まで ^{14}C 濃度が低下し、宇宙線強度変動を一年の時間分解能でダイレクトに観測できる可能性あり

太陽活動の宇宙線に対する影響



太陽活動が弱くなる (黒点数が減少) → 太陽の磁場の強さが低下 → 地球に飛来する宇宙線が増加 → 大気中の¹⁴C増加

現在、太陽活動第25周期のピークに到達していると予想されるので、引き続き観測を行う

まとめと今後の展望

ハイマツ・マツ試料を国内4地点で採取し、 ^{14}C 濃度の測定を行った結果、

- 乗鞍と蔵王における球果および葉中の $\Delta^{14}\text{C}$ 値は2018年から2025年にかけて減少傾向を示した。
- 高度依存性があることがわかった。
- 乗鞍と蔵王の球果中の $\Delta^{14}\text{C}$ 値はボムカーブの影響を反映していたのに対し、天童と東京では化石燃料による影響が示唆された。

⇒ 今後の課題

- 太陽活動第25周期と ^{14}C 濃度変動との関係を調べるために、継続して測定を行う。

- Be-7などによる宇宙線強度時間変化の検出
- 放射性セシウムの地域的時間推移と粒径分布

山形大理： 櫻井敬久、門叶冬樹、乾恵美子、武山美麗、森谷透、武田鳳胤、
鈴木颯一郎

ISEE： 三宅芙沙

ROIS-DS： 門倉昭、小財正義

アイスランド大： B. Gunnlaugur

マヒドー大(タイ)： D. Ruffolo, W. Mitthumsiri

研究代表者：山形大学理学部 門叶冬樹

- Be-7などによる宇宙線強度時間変化の検出
(R7査定額 研究費：250千円、旅費：200千円)

使用内訳：サンプリングろ紙等

柏地下微弱放射能設備による試料測定のための旅費

- 放射性セシウムの地域的時間推移と粒径分布
(R7査定額 旅費：100千円)

使用内訳：柏地下微弱放射能設備による試料測定のための旅費

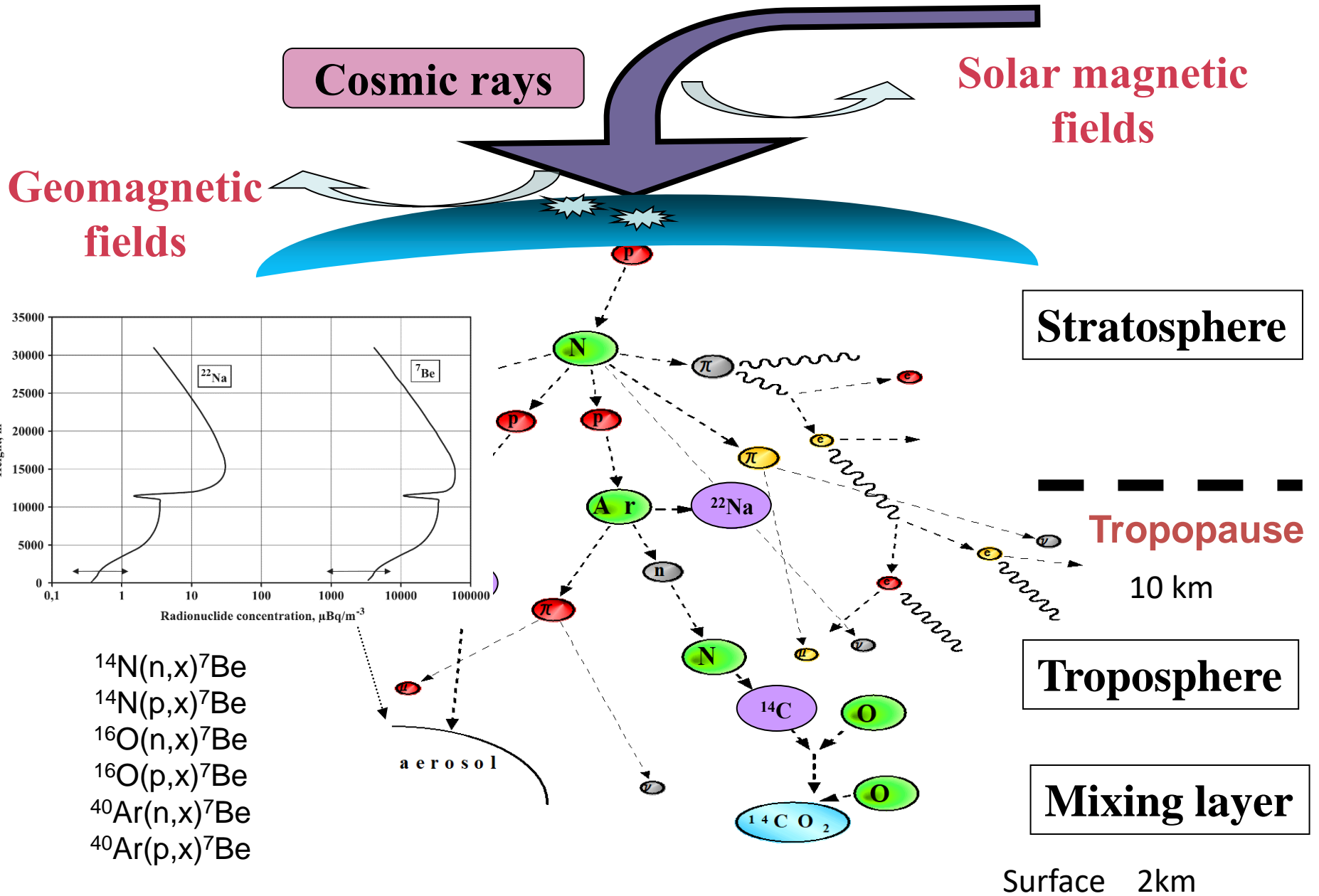
ご支援ありがとうございます。



outline

- 2000年から26年間(第23,24,25太陽活動期)の大気中宇宙線生成核種Be-7濃度変化
- 福島原発事故後の15年間の大気中Cs-137濃度の挙動の時間変化

Cosmogenic nuclide in the atmosphere



Sampling site

高緯度、中緯度、低緯度で試料収集

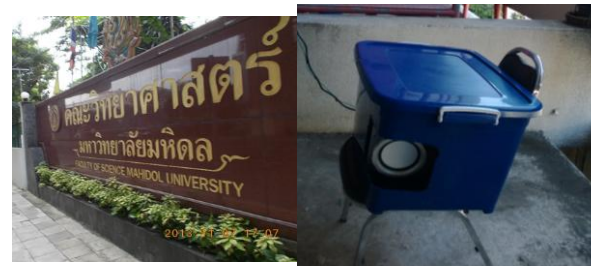
Sampling site	latitude	longitude	Altitude (m)	Sampling start	Period (yrs)
Iceland	64.47	-21.2	120	2003/Sept.	22
Yamagata	38.25	140.3	153	2000/Jan.	25
Bangkok	13.1	100.5	0	2014/Feb.	11



Yamagata



Iceland



Bangkok

Daily Sampling and Measurement of Be-7 in the atmosphere from 2000

アイスランド(高緯度) 2003年、バンコク(低緯度) 2014年より

Sampling site

Altitude: 153 m
Latitude: 38.25
Longitude: 140.3



Collected filter

• Glass fiber filter

collection efficiency : 99.99%
(ϕ 0.3 μ m particle)

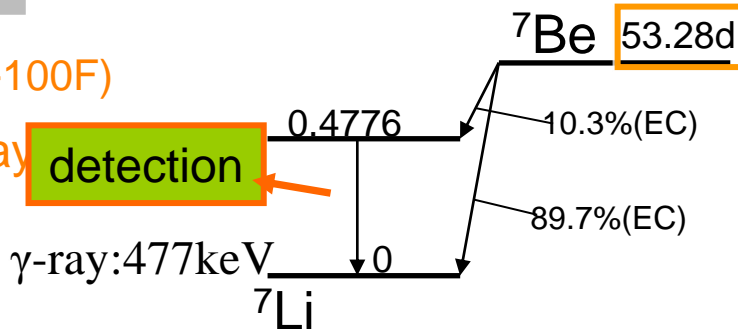
Measurement time : 6 hours

detection efficiency	2.68%
resolution @1.33MeV	1.69keV

High Volume Air Sampler (HV-100F)

Sampling time: 23 hours/day

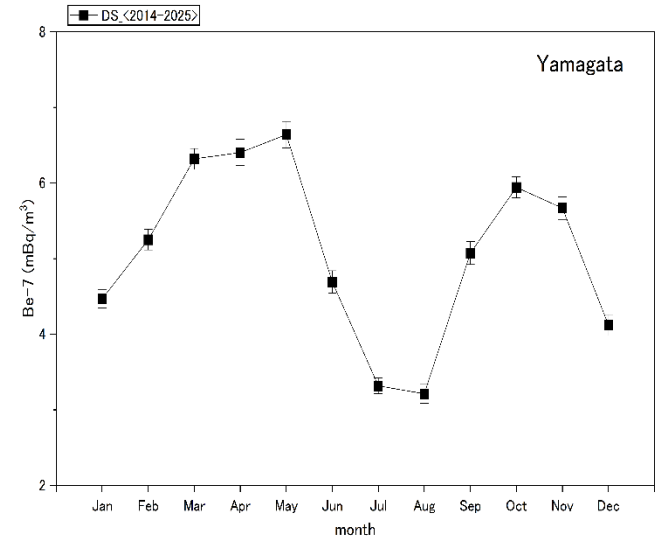
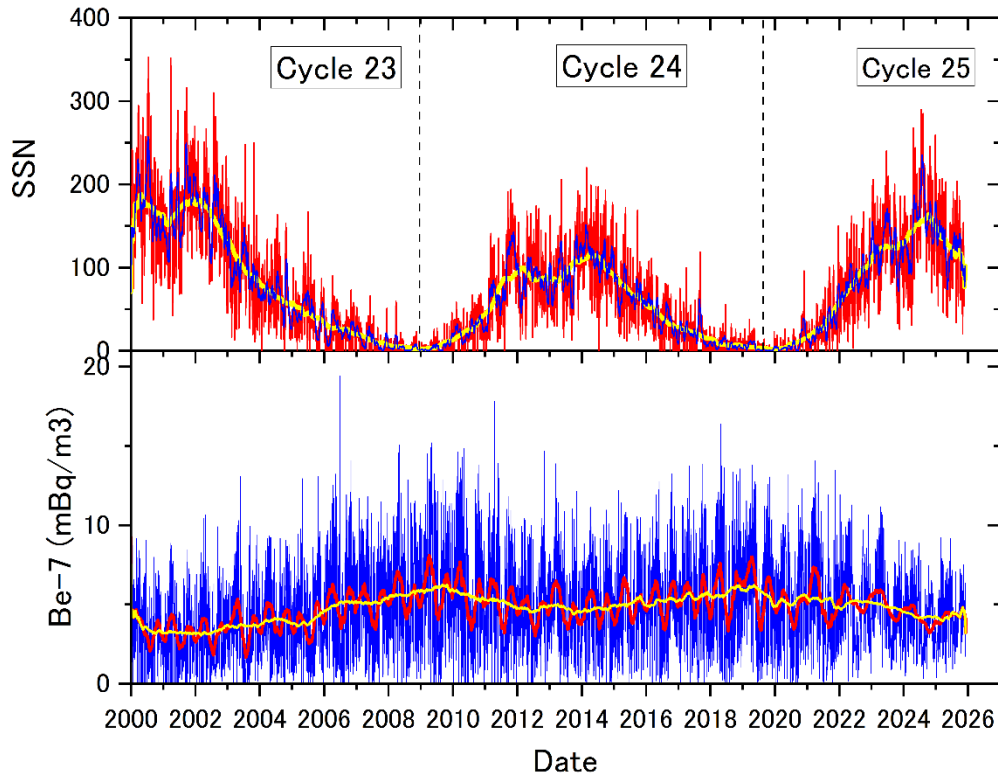
Intake rate: 1000 L/min.



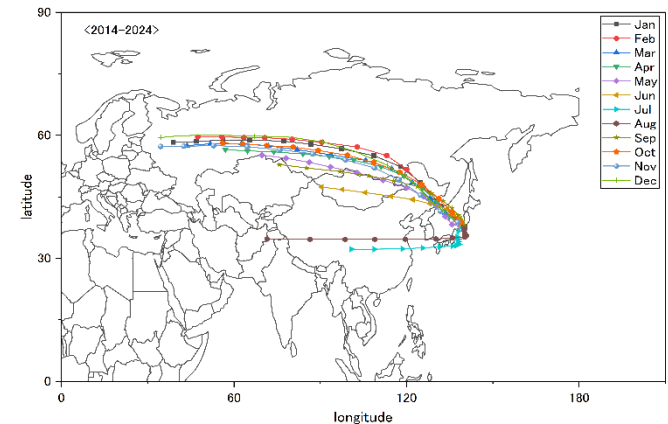
柏地下微弱放射能測定設備

HPGe detector

山形におけるBe-7濃度の日変動

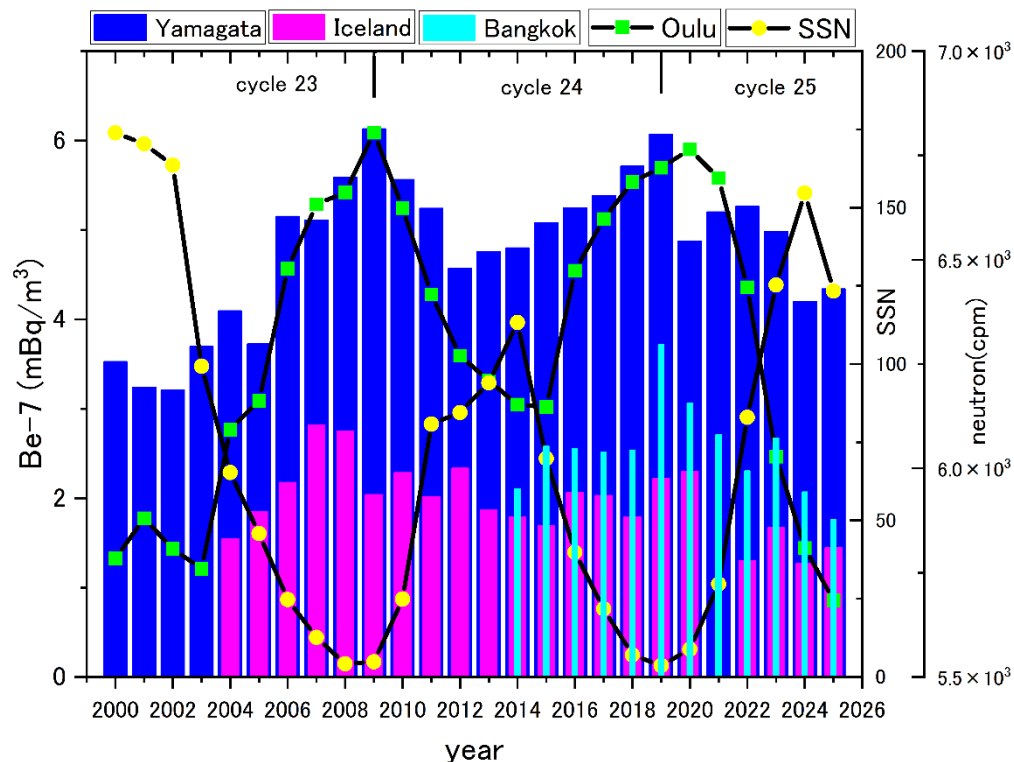


春と秋の二山構造をもつ明瞭な季節変動(2014年から12年間の月平均): 大気流跡線の季節変動と関係している。

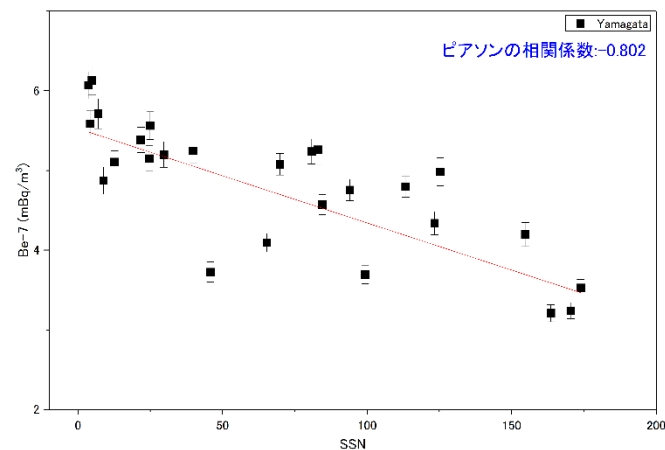


- 激しい日変動は、季節変動および年変動に重畳している。
- 2025年は、太陽黒点数の減少に転じておりBe-7濃度も増加の位相に入ったかもしれない。

Be-7濃度の年変動



2000～2025年間のBe-7濃度と太陽黒点数の相関

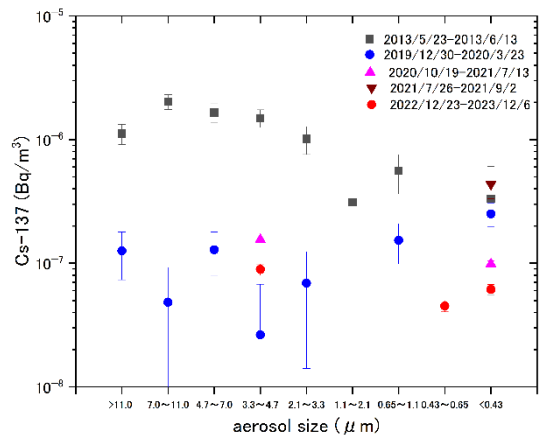
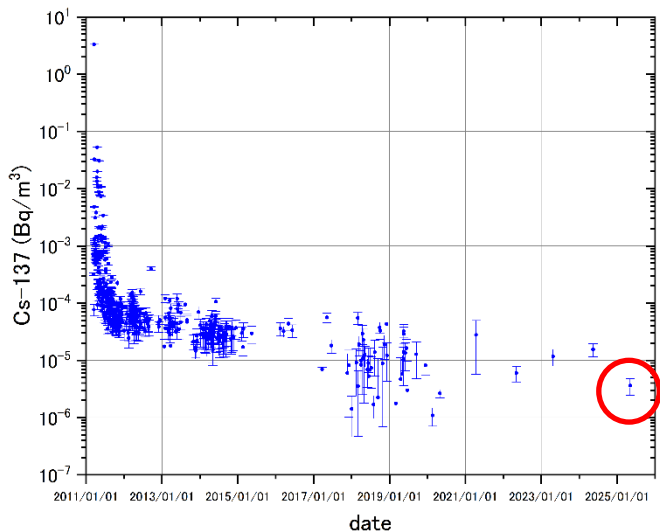


Decline rate from 2024 to 2019 during the 25th solar cycle

Yamagata (Be-7)	Iceland (Be-7)	Bangkok (Be-7)	Oulu (neutron)	Thule (neutron)	SSN
30.9%	42.7%	44.3%	13.6%	14.1%	-97.7%

Be-7濃度の減少率は中性子強度の2～3倍である

放射性セシウムの地域的時間推移と粒径分布



アンダーセンサンプラー



土壌採取も行っている

福島第一原発事故後15年間の山形大学屋上で採取した大気浮遊塵中のCs-137濃度推移：
 2025年Cs-137濃度は2012年に比べ5.3%減衰している。(半減期による減衰は26.4%)。

アンダーセンサンプラーで採取した大気浮遊塵中のCs-137濃度の粒径分布の時間推移：
 6年間で大粒径成分がエアロゾル粒子に比べ大きな減衰。その後は一定。

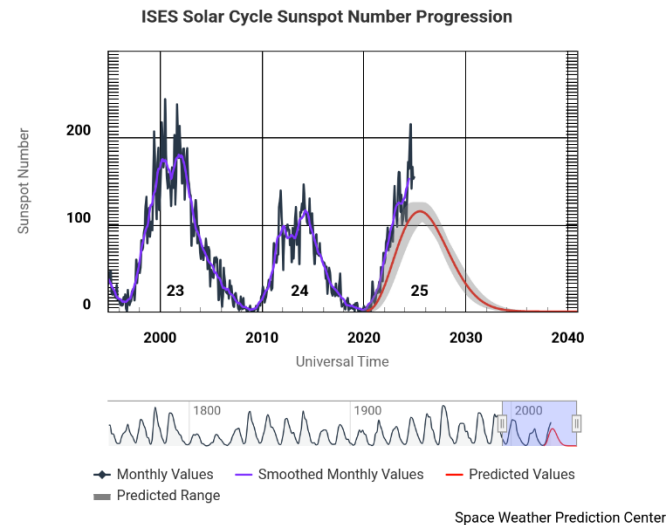
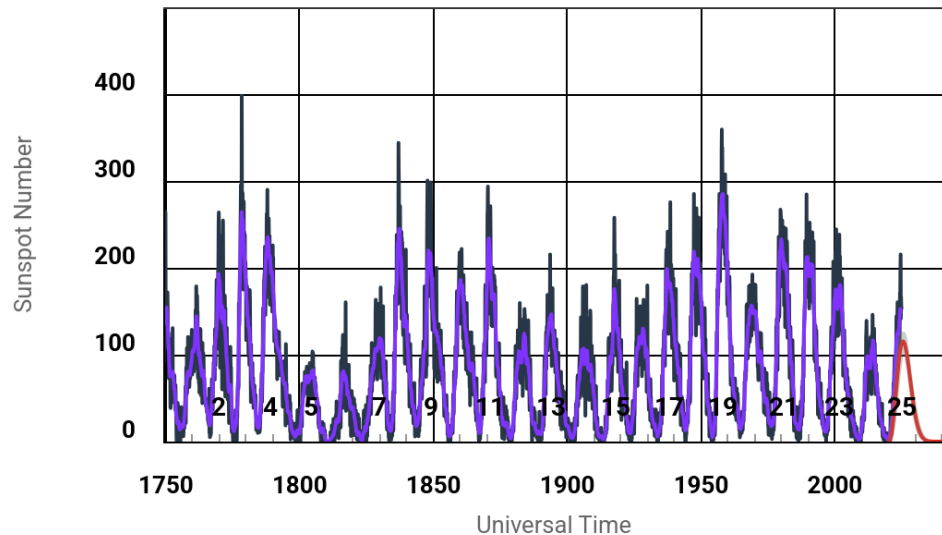
山形市周辺の森林などに沈着したCs-137が舞い上がり、時間推移により細粒化している可能性を示唆している。

福島第一原発事故後に東日本の陸地に沈着した放射性セシウム2.48 PBqのうち1.79 PBq(72.1%)のCs-137が森林に沈着したと推定された(恩田、加藤RADIOISOTOPES, 69, 67-77(2020))。

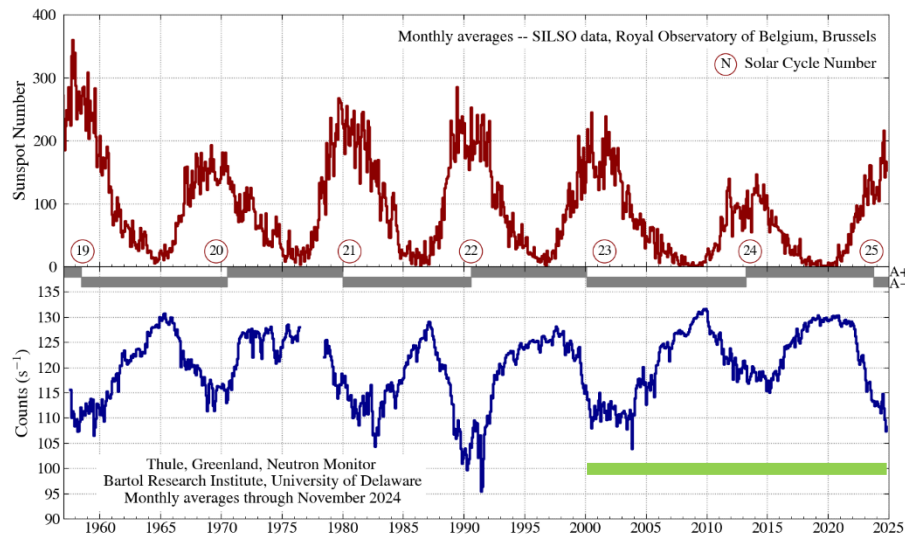
まとめ

- 2000年から26年間の大気中宇宙線生成核種Be-7濃度変化の推移が観測された。
- 第25太陽活動期においてBe-7濃度の変動は中性子強度の2～3倍であった。
- 15年間の福島原発事故後の大気中Cs-137濃度変化の推移が観測された。Cs-137の粒径分布の時間推移は細粒化の可能性を示唆している。

1750年以降の太陽黒点数の変動と予測 (from NOAA/NWS space weather prediction center)



1960年以降の宇宙線中性子強度と太陽黒点数 (from UNIVERSITY OF DELAWARE BARTOL RESEARCH INSTITUTE)



Greenland Thule (0 Gv)

Be-7 observed period