

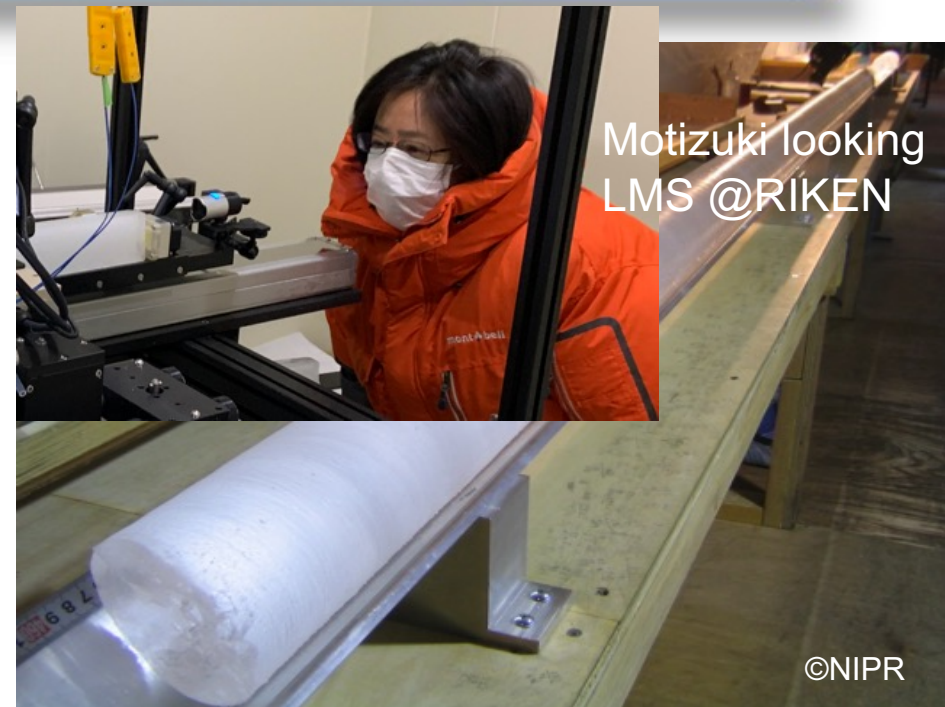
# 地質学的試料に残った超新星の痕跡について

## —氷床コア試料を中心に最近の結果と今後の挑戦—

**望月優子**

(理研/埼玉大学大学院)  
for Dome Fuji Astro-Glaciology  
Collaboration

[motizuki@riken.jp](mailto:motizuki@riken.jp)



# Collaborators for this talk

K. Takahashi, Y. Nakai, K. Makishima, Y. Yano, S. Wada, M. Yumoto,  
M. Maruyama, K. Kase, S. Okamoto (RIKEN)

H. Motoyama, K. Kawamura, M. Igarashi, K. Kamiyama (NIPR)

T. Imamura, E. Akiyoshi (NIES)

K. Suzuki (Shinshu U.)

Y. Iizuka (Hokkaido U.)

A. Hori (Kitami Inst. Tech.)

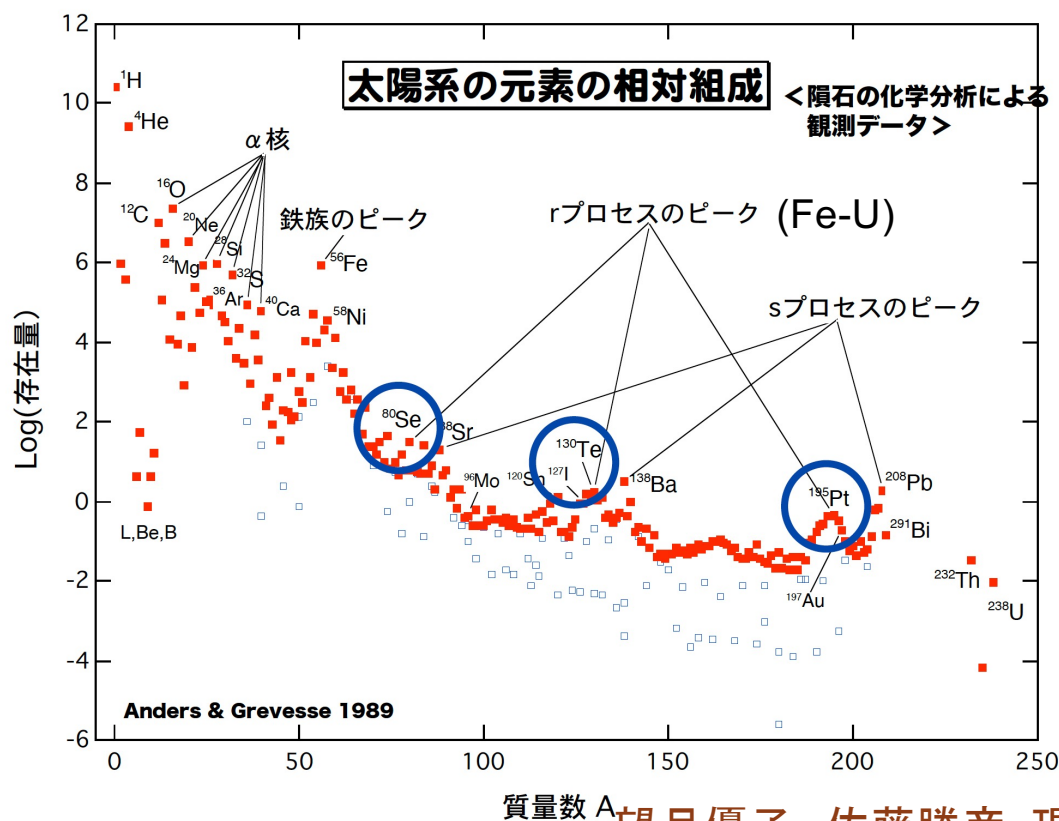
J. McCornell, M. Sigl (DSI)

A. Bamba (U. Tokyo)

and others from Dome Fuji Astro-Glaciology Collaboration

# Greatest Unanswered Questions in Physics

***“Where and how were the heavy elements from iron to uranium made?”***

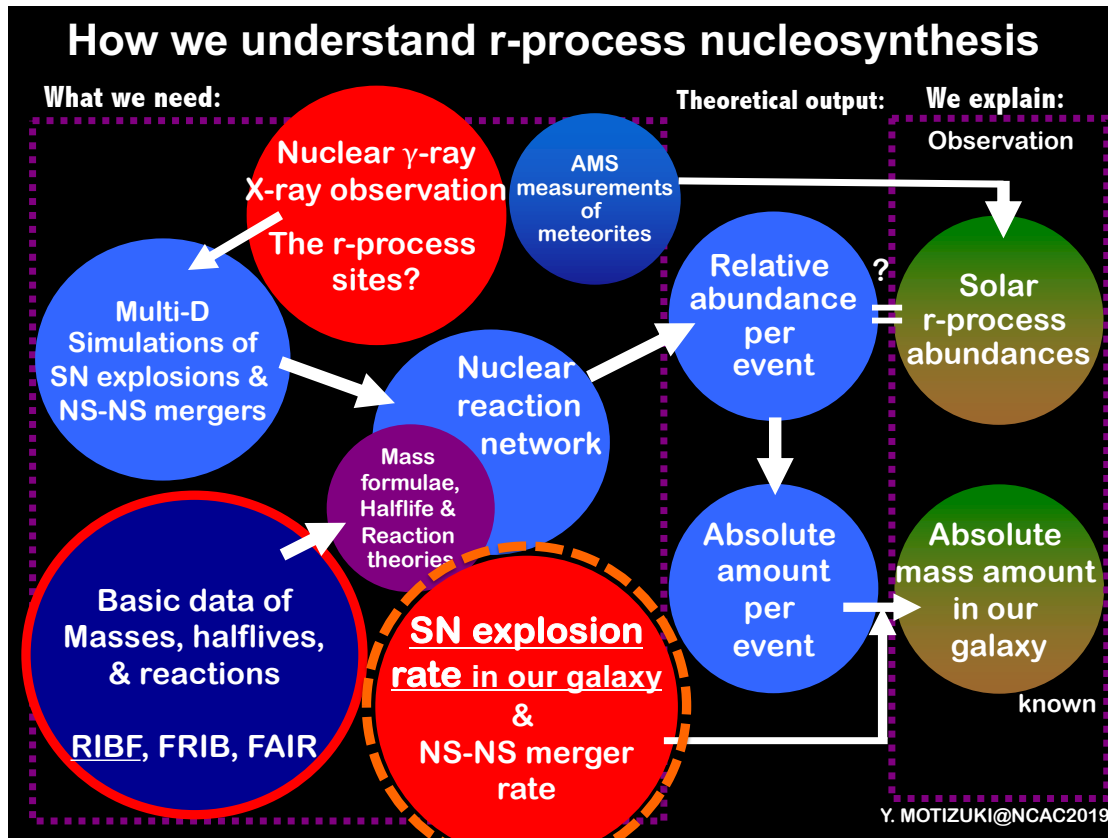


- Supernovae: Death of massive stars
- A major production site of the heavy elements

望月優子、佐藤勝彦: 現代の天文学I 第3章「元素の起源」図3.5より改変

Y. MOTIZUKI, 第9回超新星ニュートリノ研究会 2023.03.02

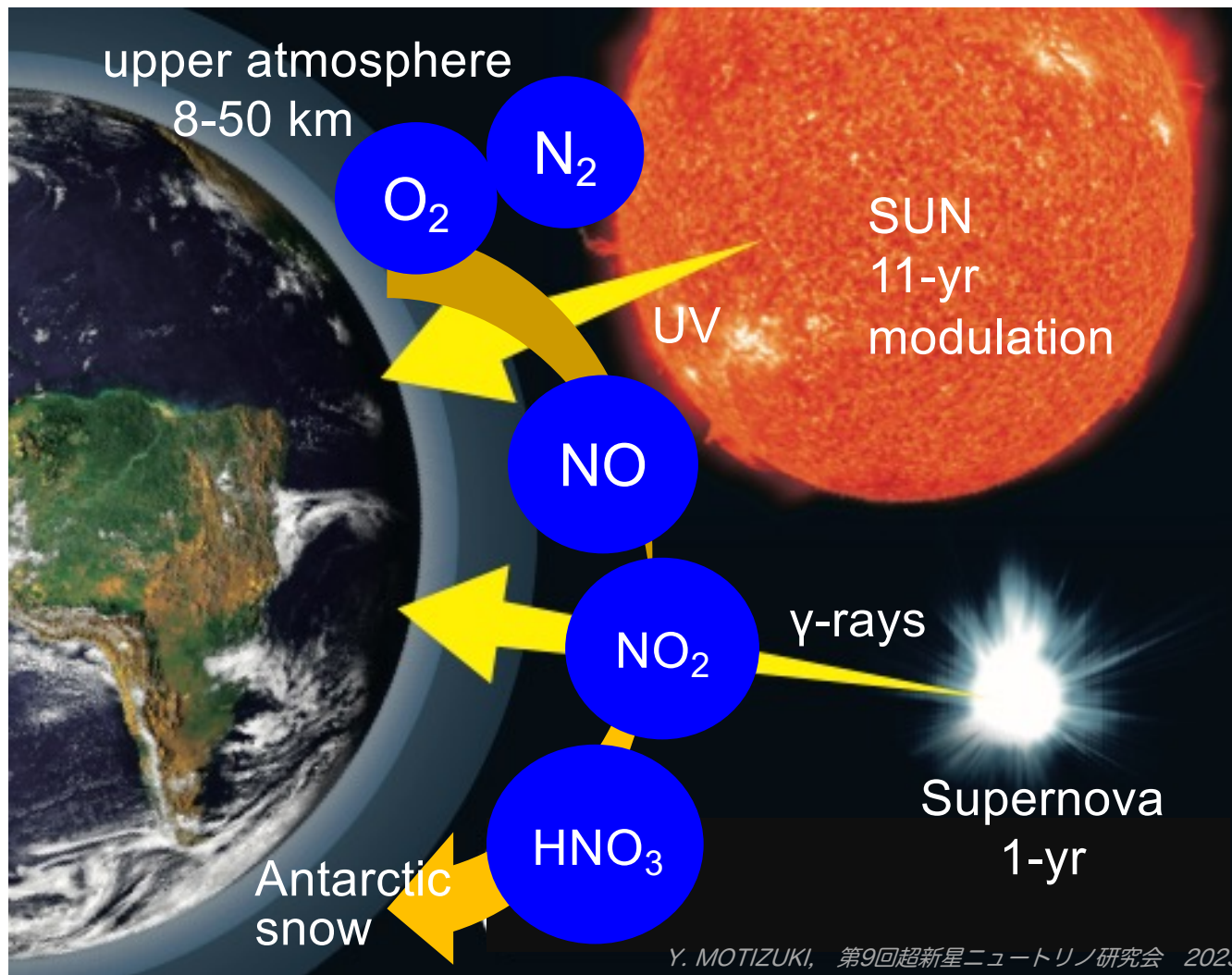
# rプロセス元素合成の総合的な理解



- 海底岩盤から $^{60}\text{Fe}$ と $^{244}\text{Pu}$ 同時発見  
Wallner+, Science 372, 2021  
ノーマルな重力崩壊型超新星でも $^{244}\text{Pu}$ ができていることを示唆。
- 銀河系化学進化 Tsujimoto, 2021
  - ✓ 一度のイベントで全てのr元素を生成
  - ✓ レアな重力崩壊型超新星と中性子星合体は両方メジャーな合成サイト
- サイトはよくわかっていない(直接証拠: r核の $\beta$ 崩壊からの核 $\gamma$ 線検出が必要)
- 天の川銀河の超新星爆発頻度  
Diehl+ 2018,2021 ( $^{26}\text{Al}$ 核 $\gamma$ 線, INTEGRAL)  
1.3 $\pm$ 0.6 events/100 years (最新値)
- 地球上のアーカイブから超新星の痕跡を見つけたい

初出 望月 2003@理研研究会

# アイスコアに超新星の痕跡をさぐる



必要なのは:

- 高時間分解能 (<1年分解能)
- 長時間データ (~百万年)

➡ アイスコア

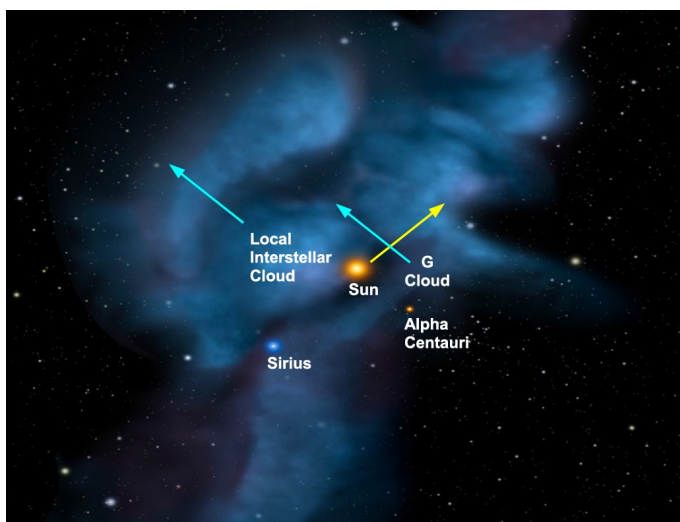
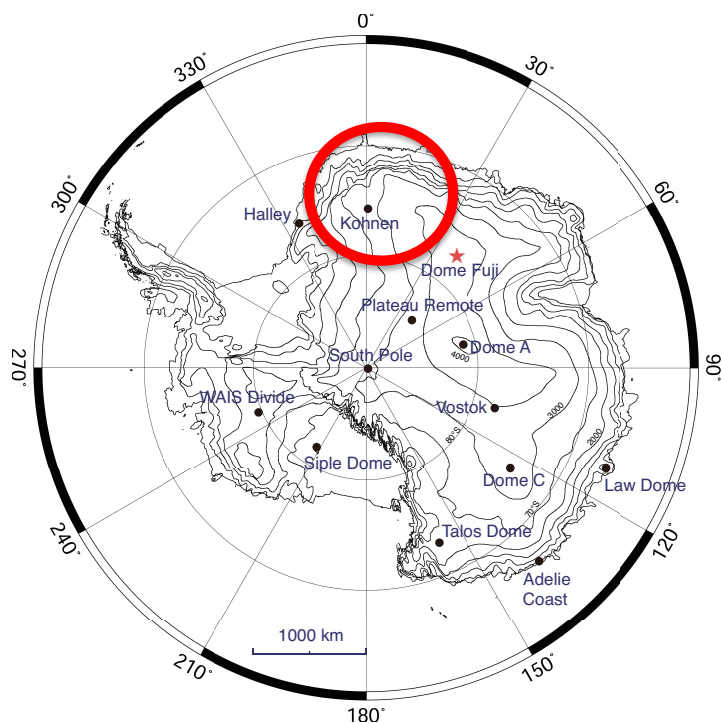
- 樹木年輪, 湖や海底堆積物

# 南極の雪から超新星の痕跡： $^{60}\text{Fe}$

Koll *et al.* PRL, 2019



- Kohnen stationの大量(500 kg)の雪の分析
- Accelerator Mass Spectroscopy (AMS)
- 過去20-30年間に $^{60}\text{Fe}$ のinfluxがある！（星間空間）
- $^{60}\text{Fe}$  ( $t_{1/2}=2.6\text{Myr}$ )：重力崩壊型超新星起源のみ
- 海底堆積物からの $^{60}\text{Fe}$ 検出：  
Knie+ 1999, 2004; Wallner+2016, etc.



- 局所バブル
- 環境との相互作用

# 海底クラストから $^{60}\text{Fe}$ と $^{244}\text{Pu}$ の同時検出

Wallner et al. Science, 2021

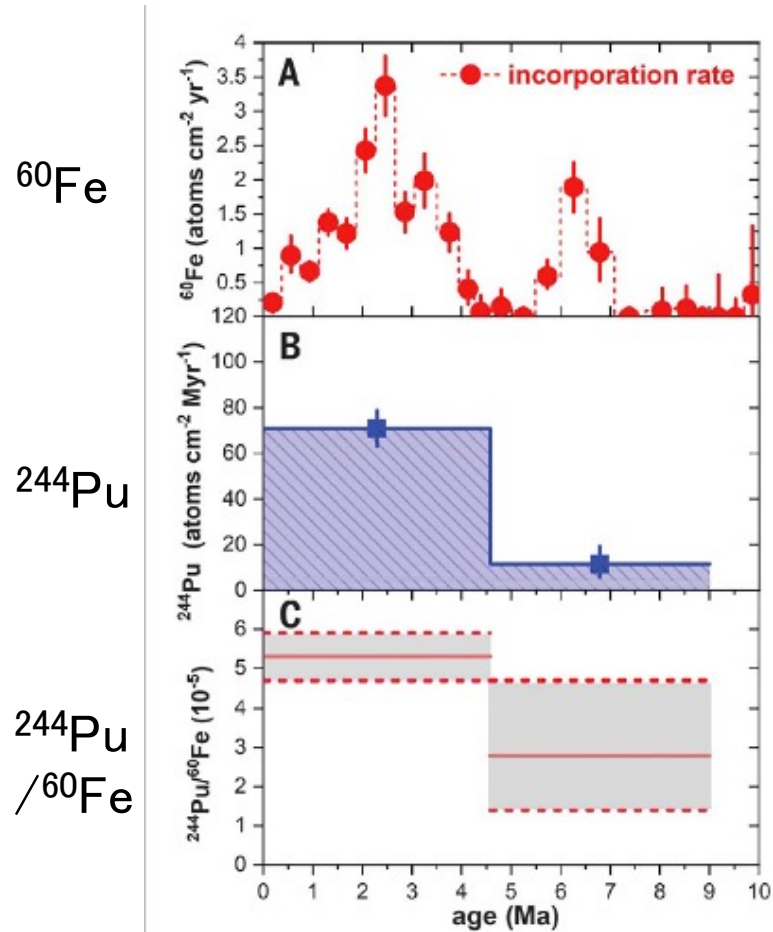


Fig. 1. Influx of interstellar  $^{60}\text{Fe}$  and  $^{244}\text{Pu}$ .

- 太平洋深海クラストから(AMS)  $^{60}\text{Fe}$  ( $t_{1/2}=2.6\text{Myr}$ )と $^{244}\text{Pu}$ ( $t_{1/2}=80.6\text{Myr}$ )を同時検出
- $^{60}\text{Fe}$ : 重力崩壊型超新星起源
- rプロセス天体サイト可能性:
  - ✓ 中性子星合体
  - ✓ レア+ノーマルな 重力崩壊型超新星?
- 同じイベントから来たのか、異なるイベントから来たのか?  
今後の課題:  $^{244}\text{Pu}$ の分解能を上げる  
see Diehl, Wallner, et al., PASA 2021



# 樹木年輪から超新星の痕跡？ : $^{14}\text{C}$ ( $t_{1/2}=5,730\text{y}$ )

Brakenridge, Int. J. Astrobiology, 2021

Vela Jr. (G266.2-1.2)

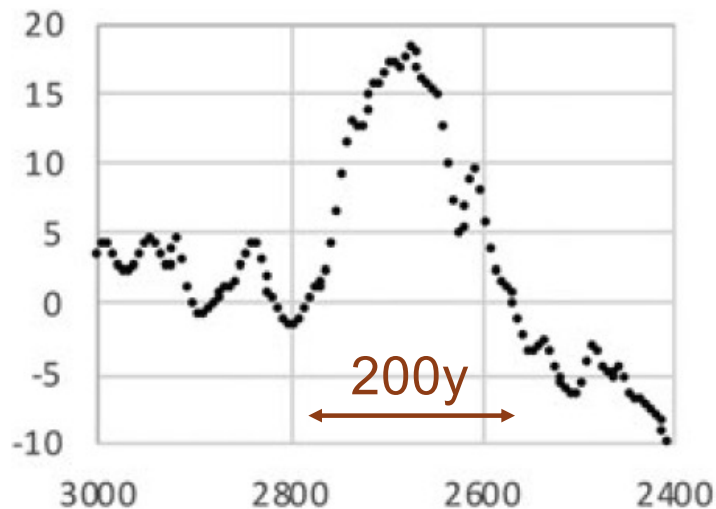
Boomerang SN (G106.3+02.7)

(e)

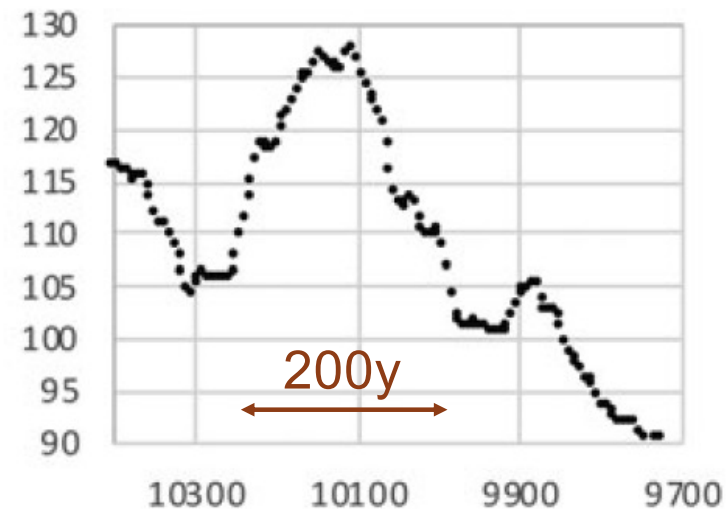
$\Delta^{14}\text{C}$

(f)

$\Delta^{14}\text{C}$



BP Before 1950 CE



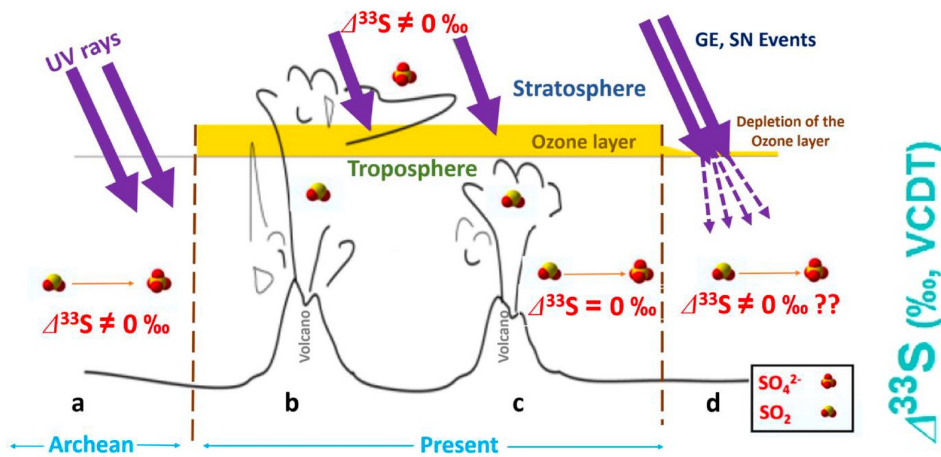
BP

- 超新星からの  $\gamma$  線エネルギー  $> 70 \text{ MeV}$  を想定  $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$
- SNで加速された宇宙線は想定していない(銀河磁場により散乱される)



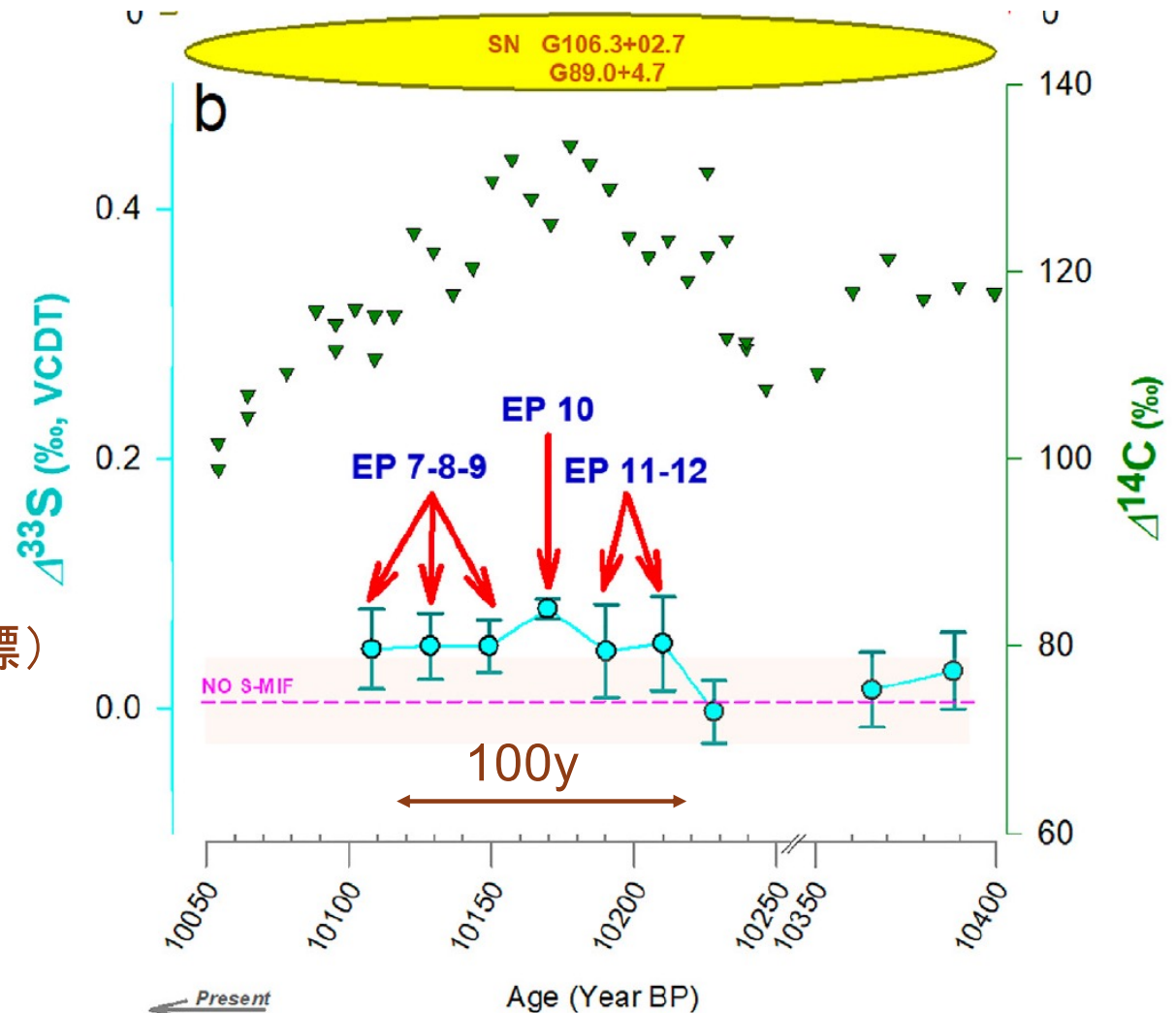
# アイスコアから超新星の痕跡？：SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 中の $\Delta^{33}\text{S}$

Dasari et al. PNAS nexus, 2022



元々は火山噴火のプロキシ(指標)

- 複数のSNeイベント: Boomerang SN (G106.3+02.7), G89.0+4.7
- ポストクアイスコア
- 時間分解能約20年



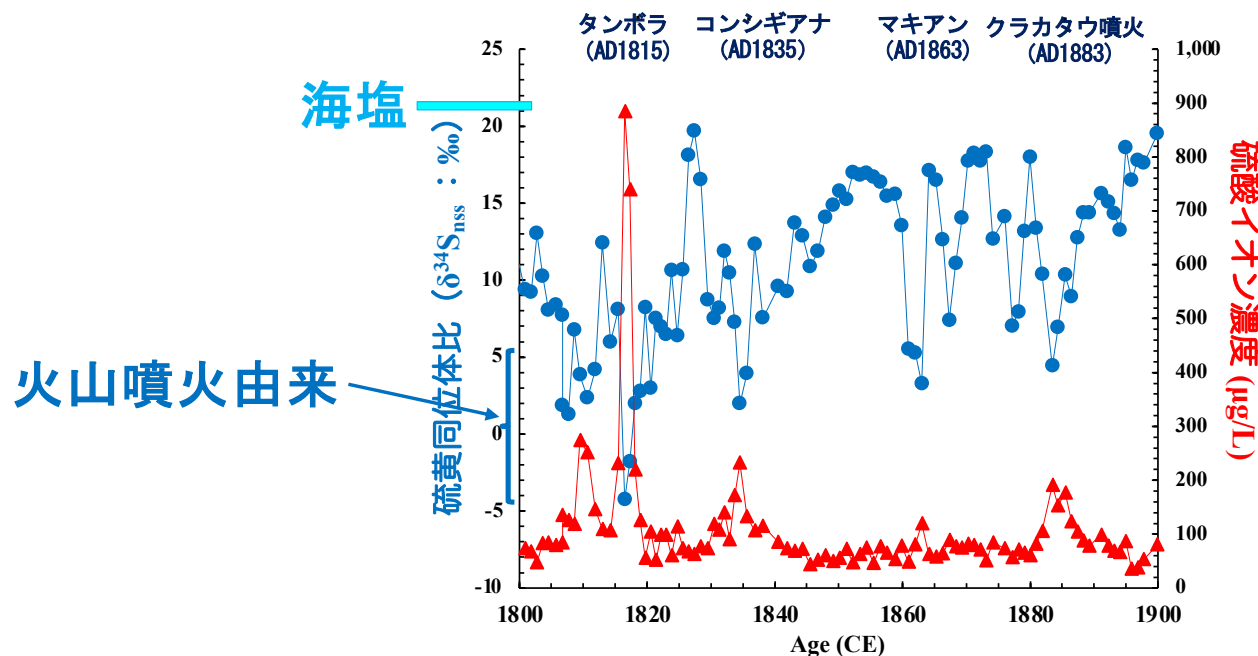
# アイスコア中の硫黄同位体比 ( $\delta^{34}\text{S}$ , $\Delta^{33}\text{S}$ )分析 @RIKEN

- 高感度化に成功。従来の1/100の試料の量で分析可能に。  
→DFアイスコアの  $\delta^{34}\text{S}$  の1年時間分解能分析が可能に(火山噴火やSN解析に必須)
- 2022年度～  $\Delta^{33}\text{S}$ と  $\delta^{34}\text{S}$ の同時分析の実現を目指す

K. Takahashi, Nakai, Motizuki, *et al.*, 2022

$$\delta^{34}\text{S} = \frac{\{ (^{34}\text{S}/^{32}\text{S})_{\text{試料}} - (^{34}\text{S}/^{32}\text{S})_{\text{標準}} \}}{(^{34}\text{S}/^{32}\text{S})_{\text{標準}}} \quad (\text{‰})$$

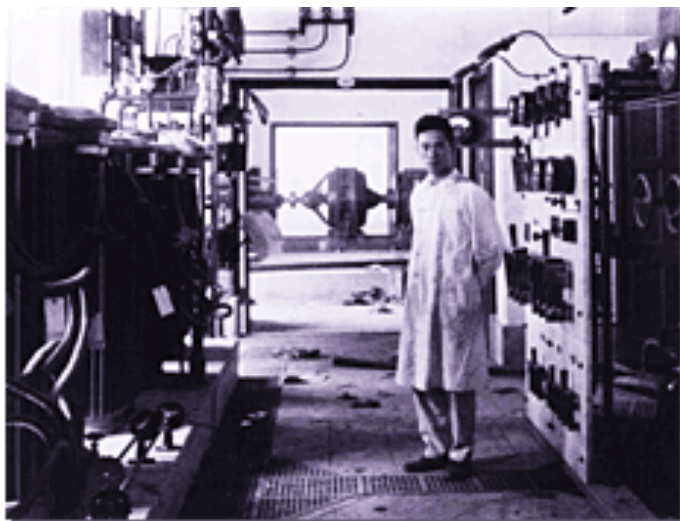
標準 : Canyon Diablo隕石中のトロイライト (FeS)



通常の化学反応や物理状態変化では  
 $\Delta^{33}\text{S} \doteq 0.515 \delta^{34}\text{S}$   
 であることが確認されている。  
 しかし、ラジカル反応を経ると  
 $\Delta^{33}\text{S} \neq 0.515 \delta^{34}\text{S}$

- 1年分解能の連続的な解析により、光化学反応の影響の新たなプローブになる

# 中谷宇吉郎(日本の「雪氷学の父」)@RIKEN



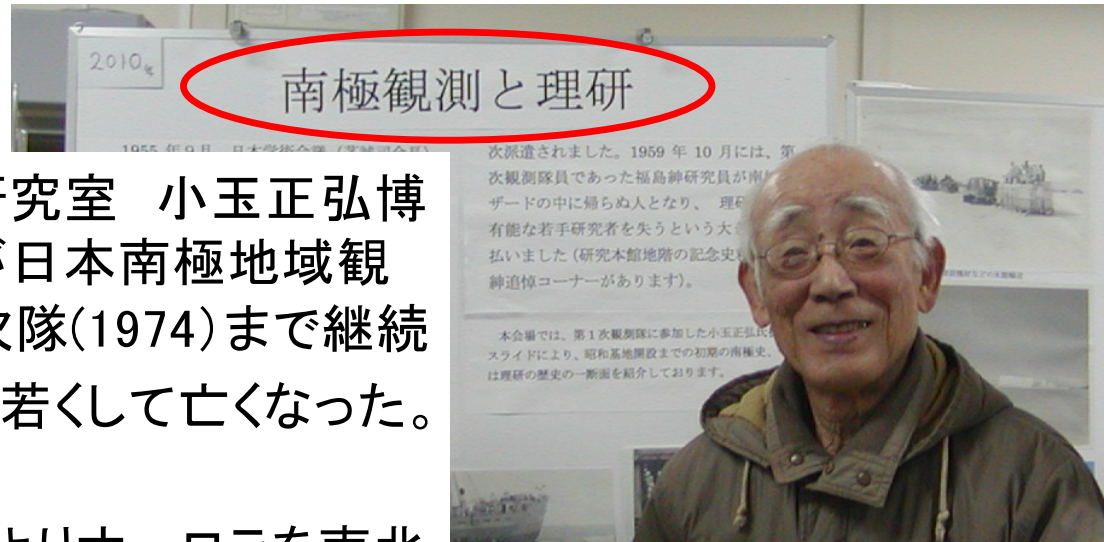
駒込・理化学研究所で実験を行う中谷宇吉郎

「中谷宇吉郎雪の科学館」HPより  
@石川県加賀市(出身地)

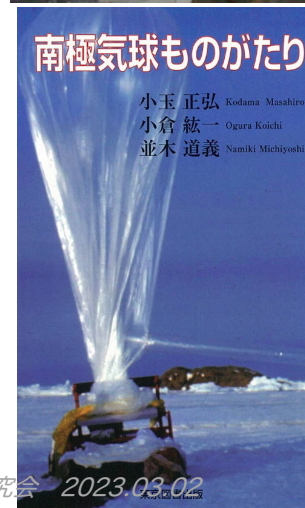
- 1957-1960 北極グリーンランド氷冠の研究  
(4回渡航)

- 1925- 理研寺田寅彦研究室助手
- 火花放電(線香花火)の研究
- 3000枚の写真撮影 写真技術  
雪の結晶の研究に役に立った
- 1928- イギリス留学  
霧箱のウィルソンと交流
- 1930 北大助教授  
1931 再び理研嘱託
- 1934 山崎文男(仁科研継承)と電  
気放電の霧箱撮影に世界初成功  
=>気体の絶縁破壊研究の進展
- 1936 世界で初めて人工雪の合成  
に成功
- 1942 (寺田研後継)清水研 研究員

# 理研の南極宇宙線研究 [南極観測の創生期]



- (仁科研後継)理研宇宙線研究室 小玉正弘博士による南極宇宙線研究 が日本南極地域観測隊第1次隊(1956)から14次隊(1974)まで継続
- 理研の研究者 福島紳隊員:若くして亡くなった。第4次南極観測隊
- 宇宙放射線の研究、気球によりオーロラを南北両半球で世界初同時観測
- 副産物:気球で観測された太陽からのX線  
=>太陽X線観測天文衛星に発展

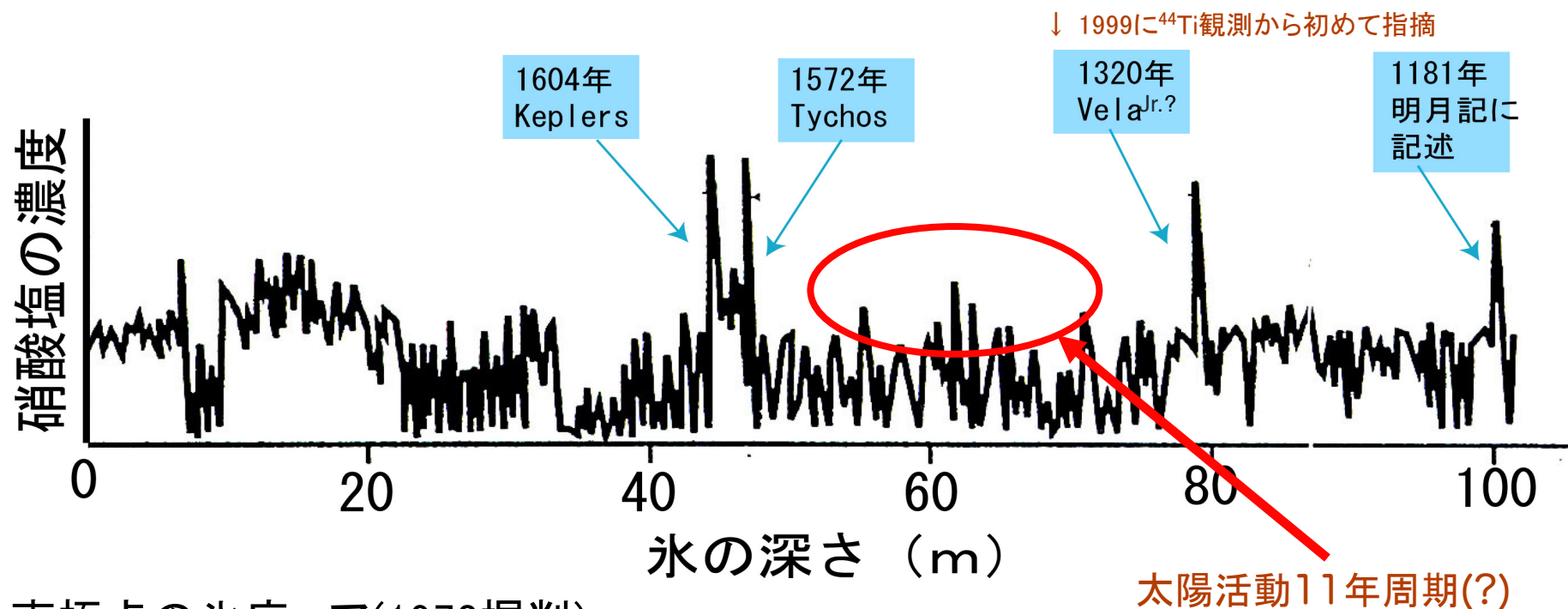


小玉正弘博士

小玉正弘ら著(2011)

# 南極氷床コアに超新星の痕跡?

Rood *et al.*, Nature 282 (1979) 701-703.



- 南極点の氷床コア(1978掘削)
- 他グループの他コアの分析から批判あいつぐ(1981-1990)
- 著者らスパイクはコアの汚染と結論し撤回(1983) (for 1979-2<sup>nd</sup> core)、再度主張



# 北極グリーンランドと南極大陸



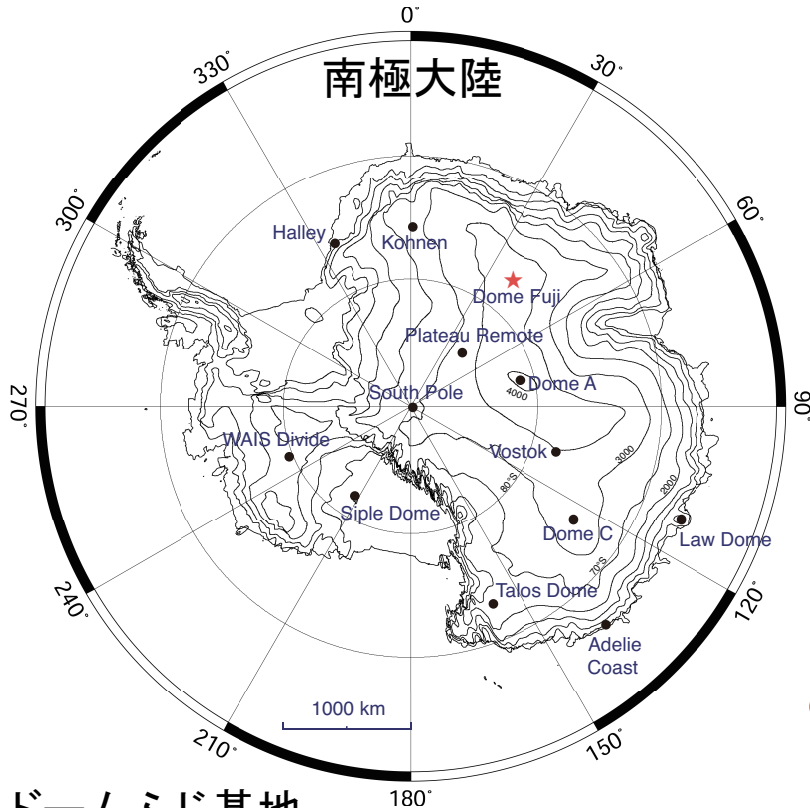
北半球



南半球

- 自然変動を調べるには南極のアイスコアがよい。

# 南極大陸ドームふじ基地とアイスコア



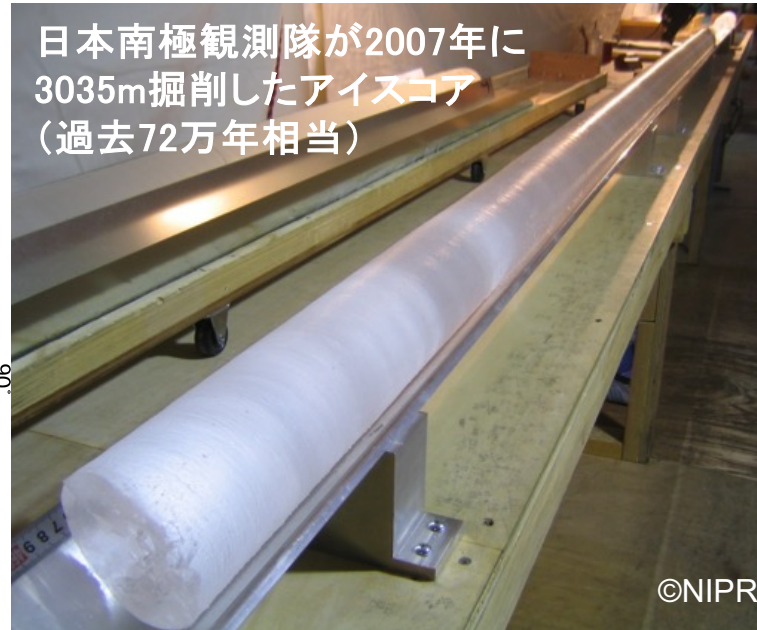
## ドームふじ基地

高度: 3,810m

年平均気温:  $-54.3^{\circ}\text{C}$

観測された最低気温:  $-79.9^{\circ}\text{C}$

年平均涵養量: 約30mm(水当量換算)



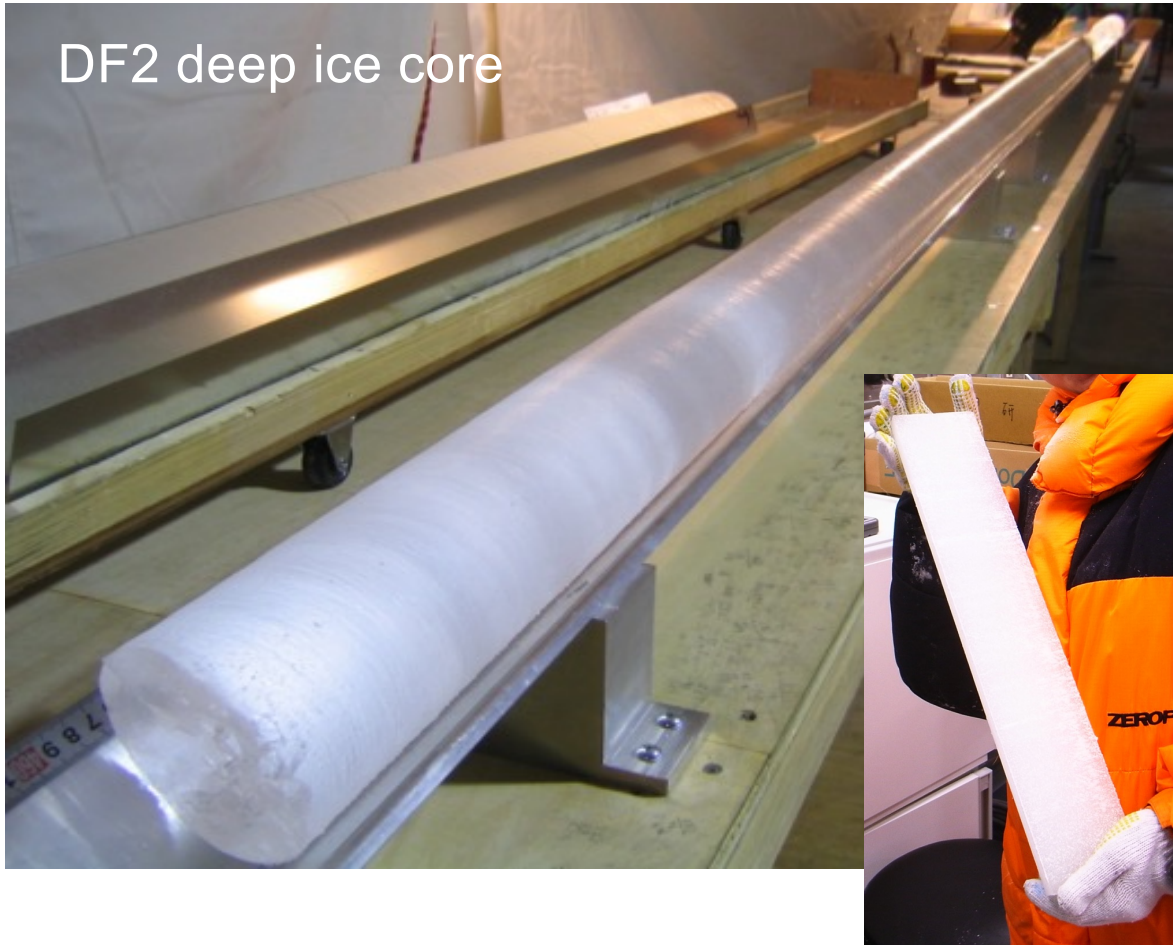
日本南極観測隊が2007年に  
3035m掘削したアイスコア  
(過去72万年相当)



- 宇宙線や太陽UVによる $\text{HNO}_3$  ( $\text{NO}_y$ ) 形成は、成層圏(高度8-50 km)で起きる(対流圏ではない)
- 1960年代成層圏核実験によるトリチウム濃度が南極大陸18 サイトの中でドームふじ基地が最大  
Dome Fuji: 4200 ; Dome C: 1820 ; Halley Bay: 620 (TU)  
Fourre+, 2006



# ドームふじ深層コア DF1 DF2 DF3

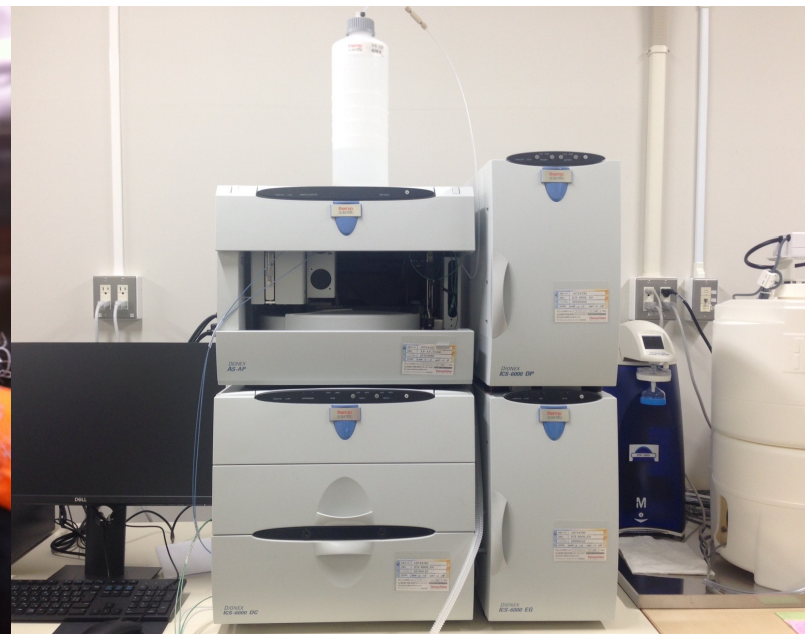


- DF2: 3035.22 m  
Drilling: 2001–2007
- Dating: 0.72 million years;  
[Kawamura+ 2017](#)
- New Dome Fuji Station Project:  
DF3 ice core targeting 0.8–1.5  
M years
- DF01 浅層コア (DF2 深層コアの  
トップ部分に相当)

# アイスコアのサンプリングとイオン分析



コアを切断する前、形状記録をしている様子(望月)

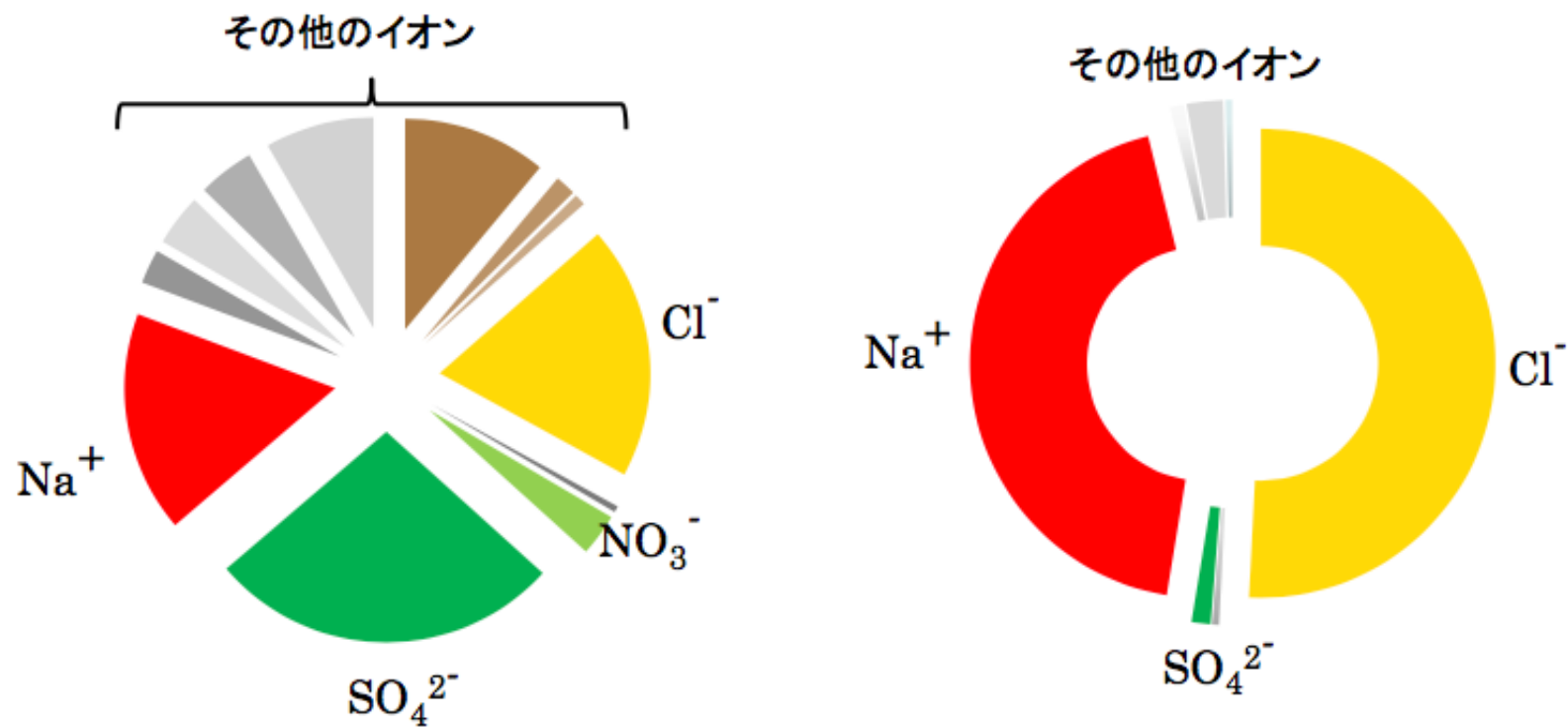


理研の高感度イオンクロマトグラフィー装置(2021)

- 国立極地研低温室(-30°C、-50°C)で手作業のサンプリング・化学整形
- 時間分解能1年弱(2.5-4 cm)
- 理化学研究所にて分析及び解析(陰陽イオン、水同位体比)

# DF01コアの平均化学組成：成層圏成分の傍証

Motizuki et al., 2017

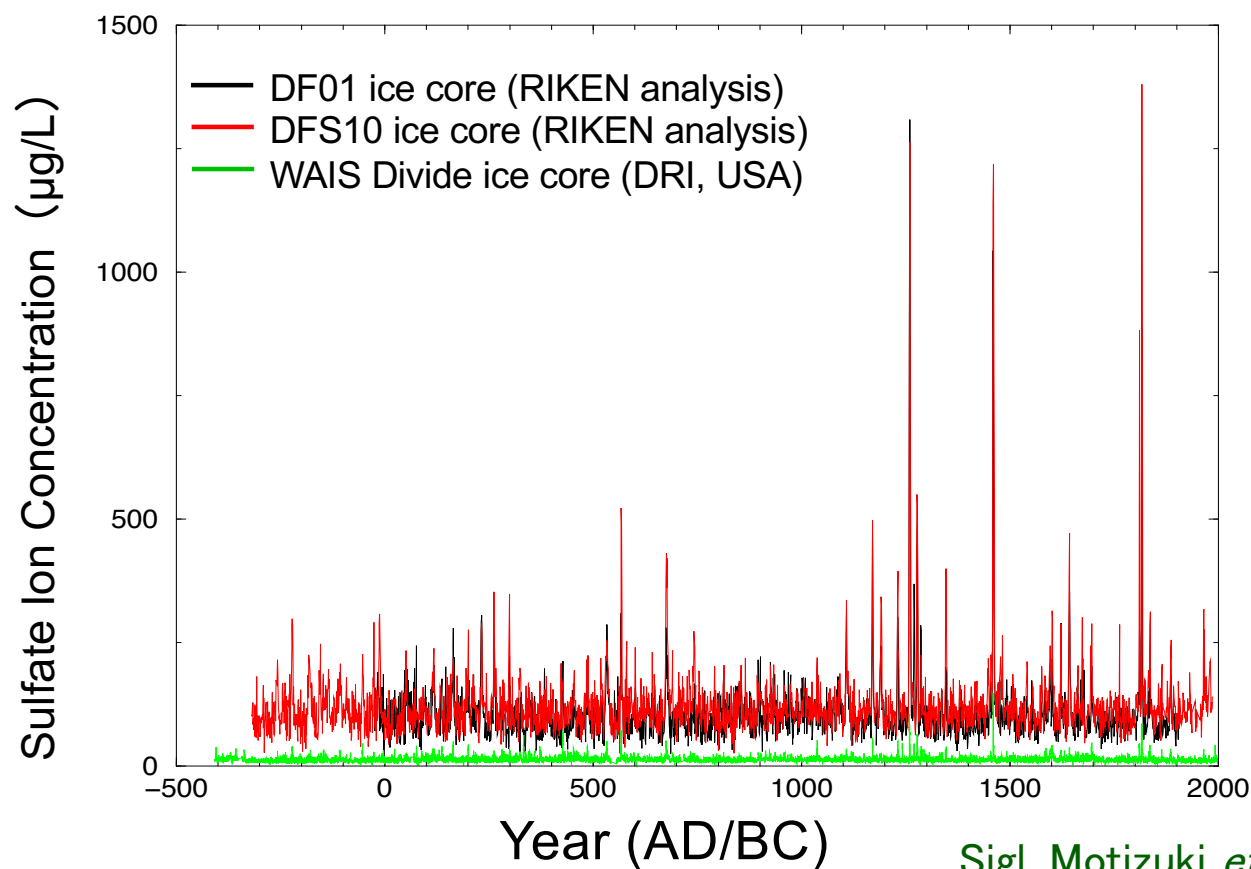


(a) DF01氷床コアの平均化学組成

(b) 海水に由来する海塩の化学組成

イオンの量はモル当量(物質質量(モル)濃度にイオン価数をかけたもの)を用いた濃度(Eq/L)

# 過去2000年の火山噴火の歴史: $\text{SO}_4^{2-}$



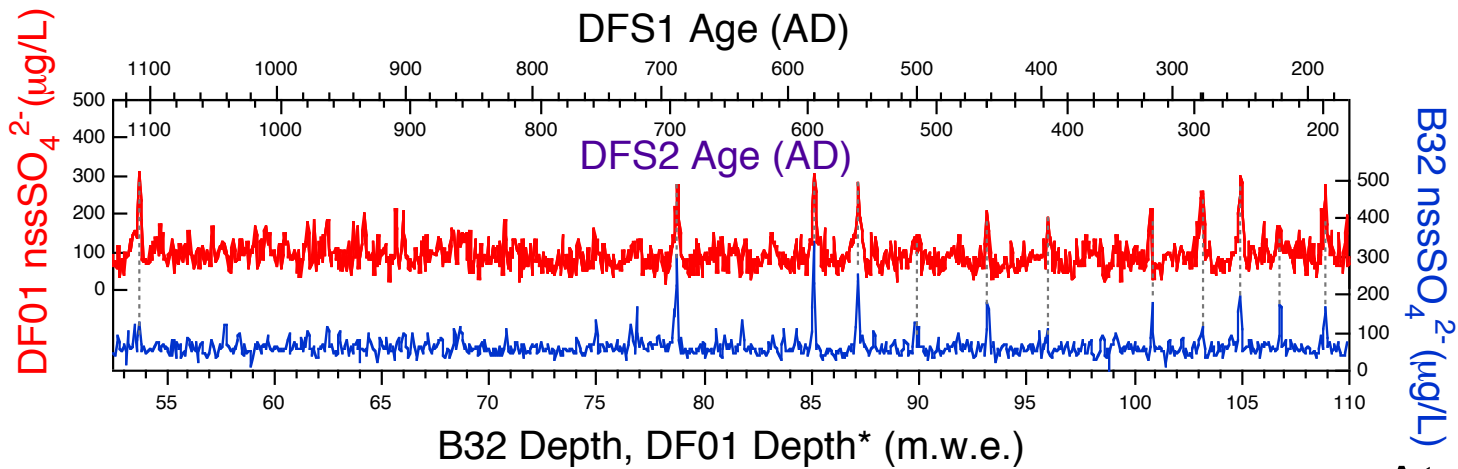
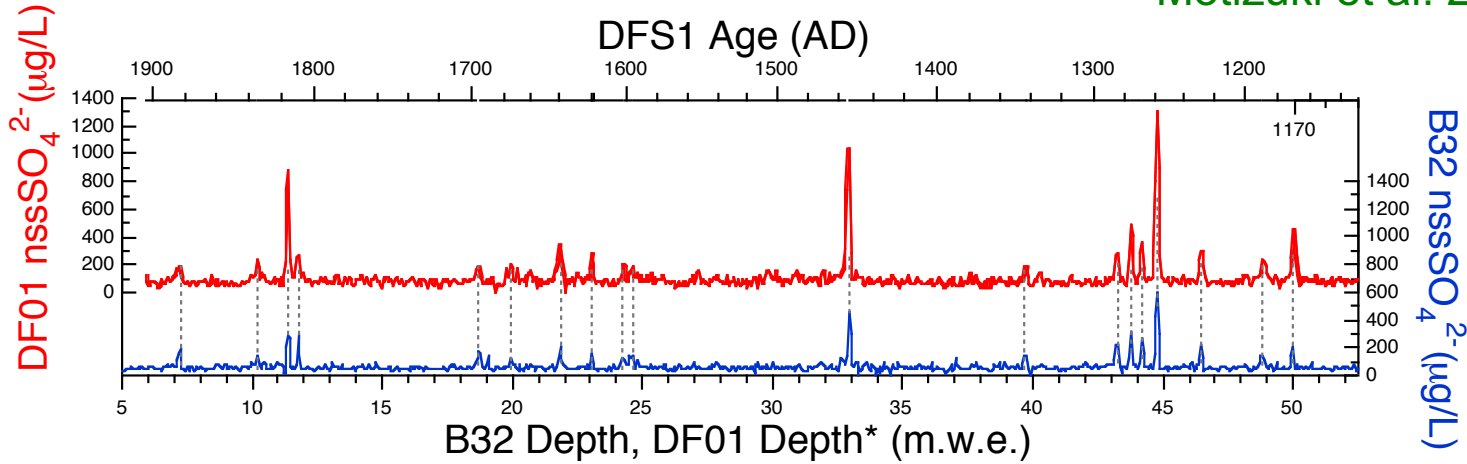
- 2本のアイスコアの2000年分析に数年がかかり >5000 サンプル超
- ドームふじコアの優位性
- 火山噴火の感度  
~WAISコアの約3倍

Sigl, Motizuki *et al.*, Nature Climate Change, 2014.

Thomas, Vladimirova, Motizuki *et al.*, submitted to ESSD

# DF01コアの年代軸決定

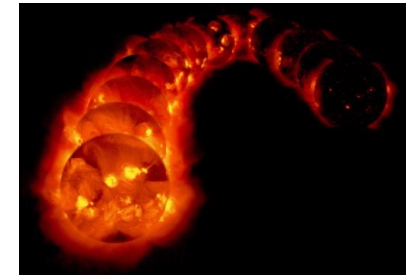
Motizuki et al. 2014



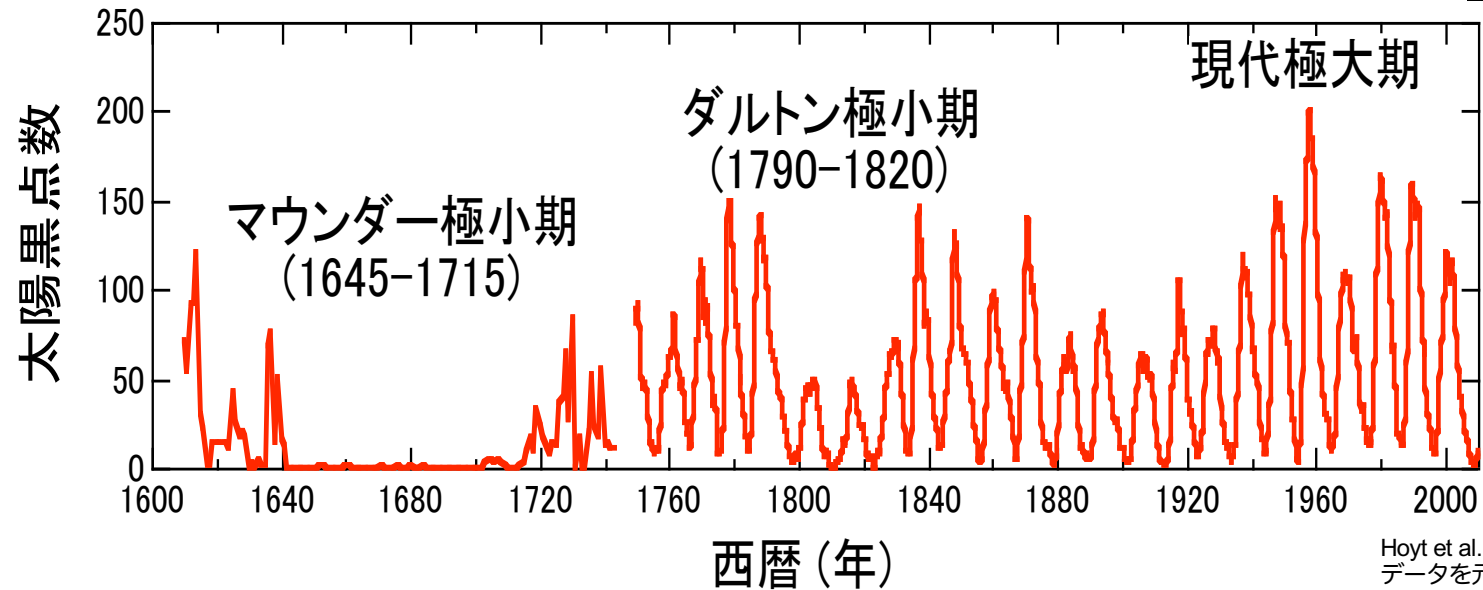
31 eruptions

$\Delta t \sim 0.9 \text{ yrs}$

# 太陽活動の指標



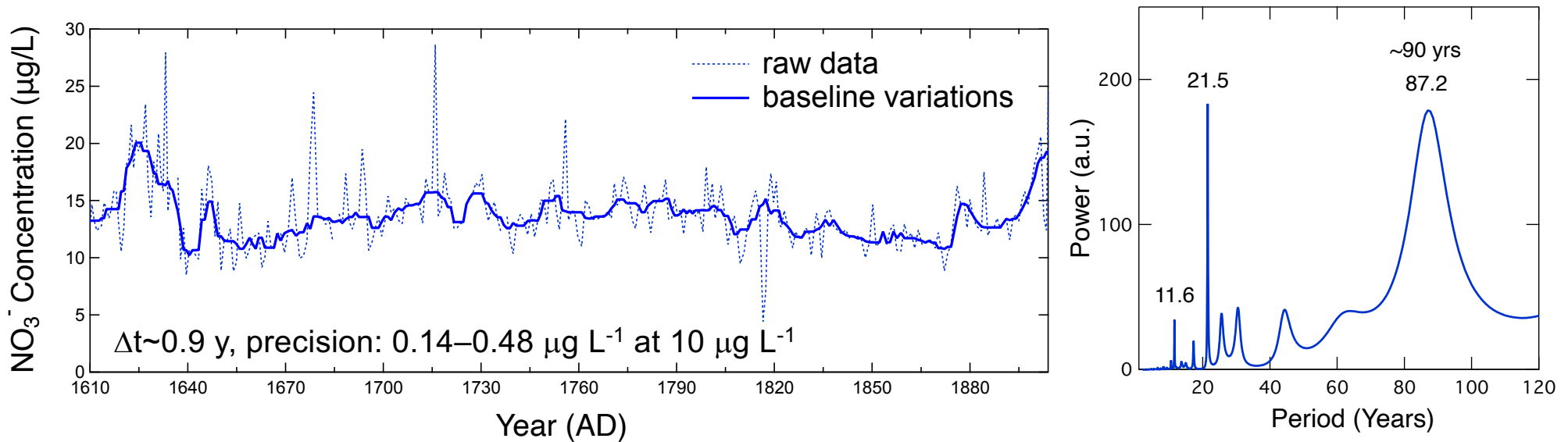
太陽活動～黒点数. 系統的な観測はガレリオ以来、過去400年



- 知られている太陽周期: 11, 22, ~88, ~200, ~420, ~2300年
- 中長周期は気候変動に関連すると考えられている

# アイスコア中のNO<sub>3</sub><sup>-</sup>に11年、22年太陽周期の発見

超新星解析の前段階として必要 ~10ppbの超微量分析

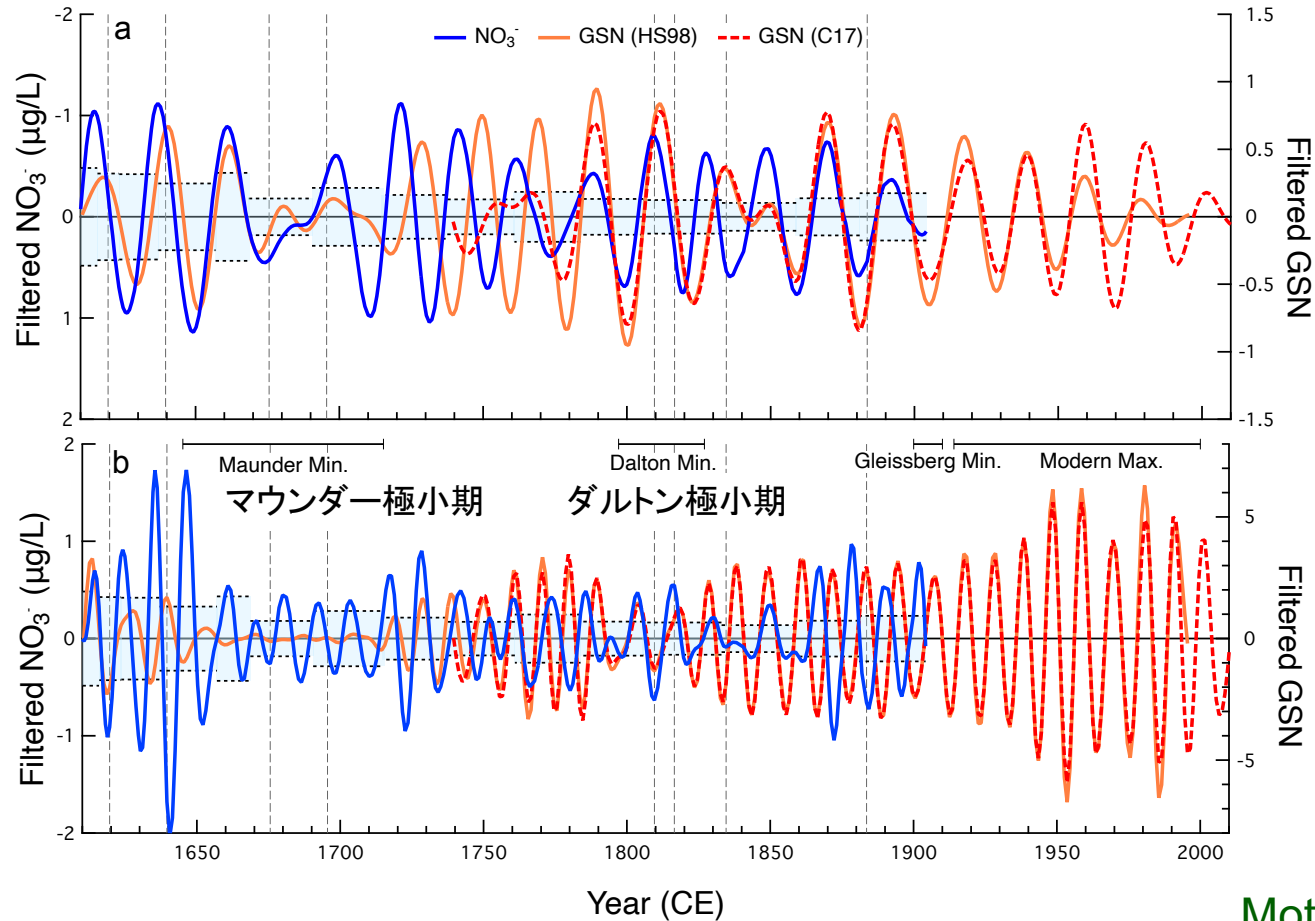


- 約11年、約22年、約90年の3つの周期を同時検出 信頼度 > 99%
- 10年オーダーの複数周期の同時検出は世界初
- 11年周期が見つからないアイスコアでは、SNシグナルはみつからない: SN  $\gamma$  線では基本的に太陽UVと同じNO<sub>y</sub>生成サイクルがまわるため

**太陽周期抽出の手法を確立**

Motizuki *et al.*, submitted to PJA, Ser. B  
(日本学士院紀要招待論文)

# 帯域フィルターをかけた太陽黒点数の変動とNO<sub>3</sub><sup>-</sup>変動

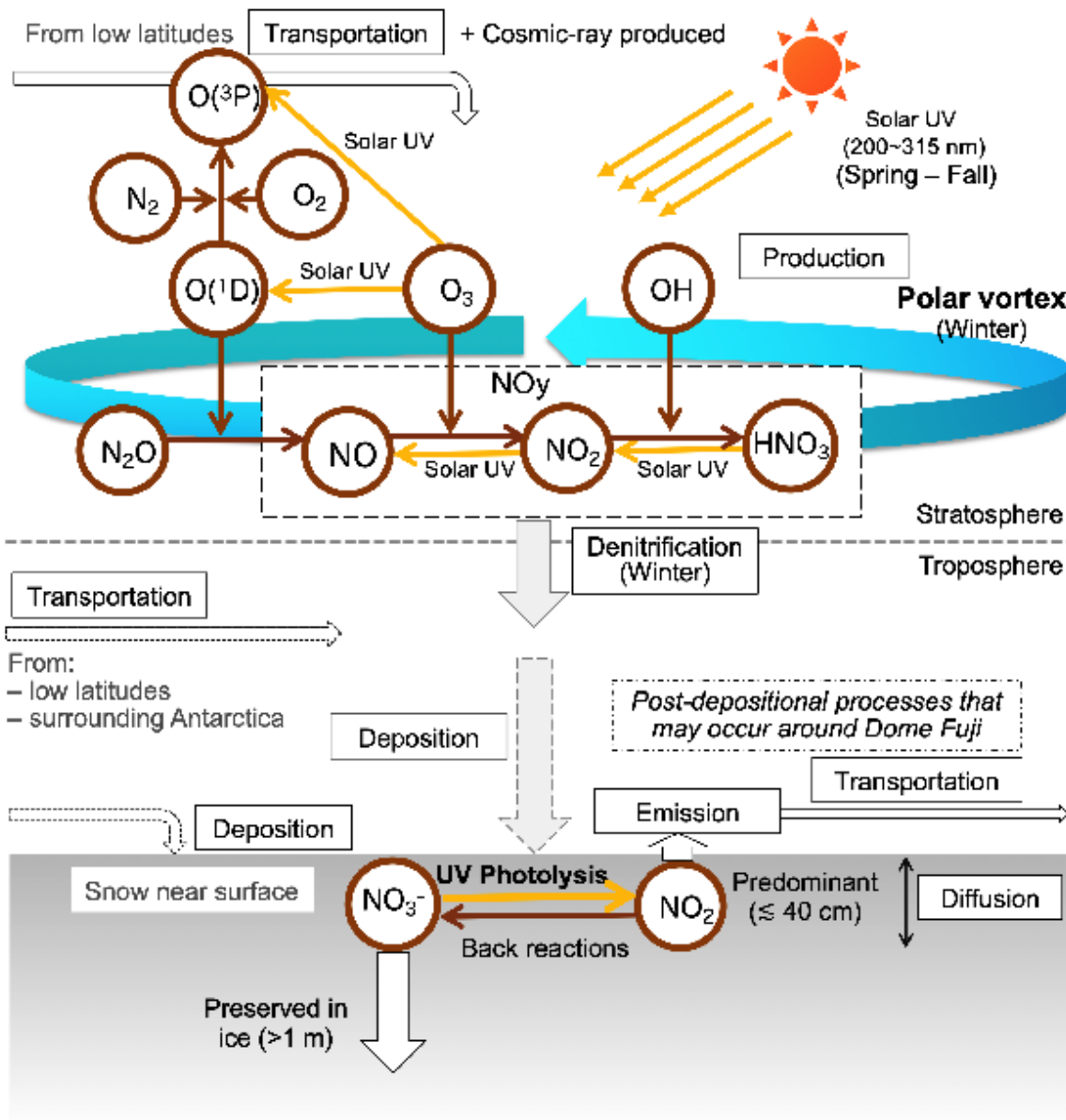


- 11年、22年周期を(詳細年代が決めづらい)深層コアの解析で年代の「ものさし」として利用可能

Motizuki *et al.*, submitted to PJA, Ser. B



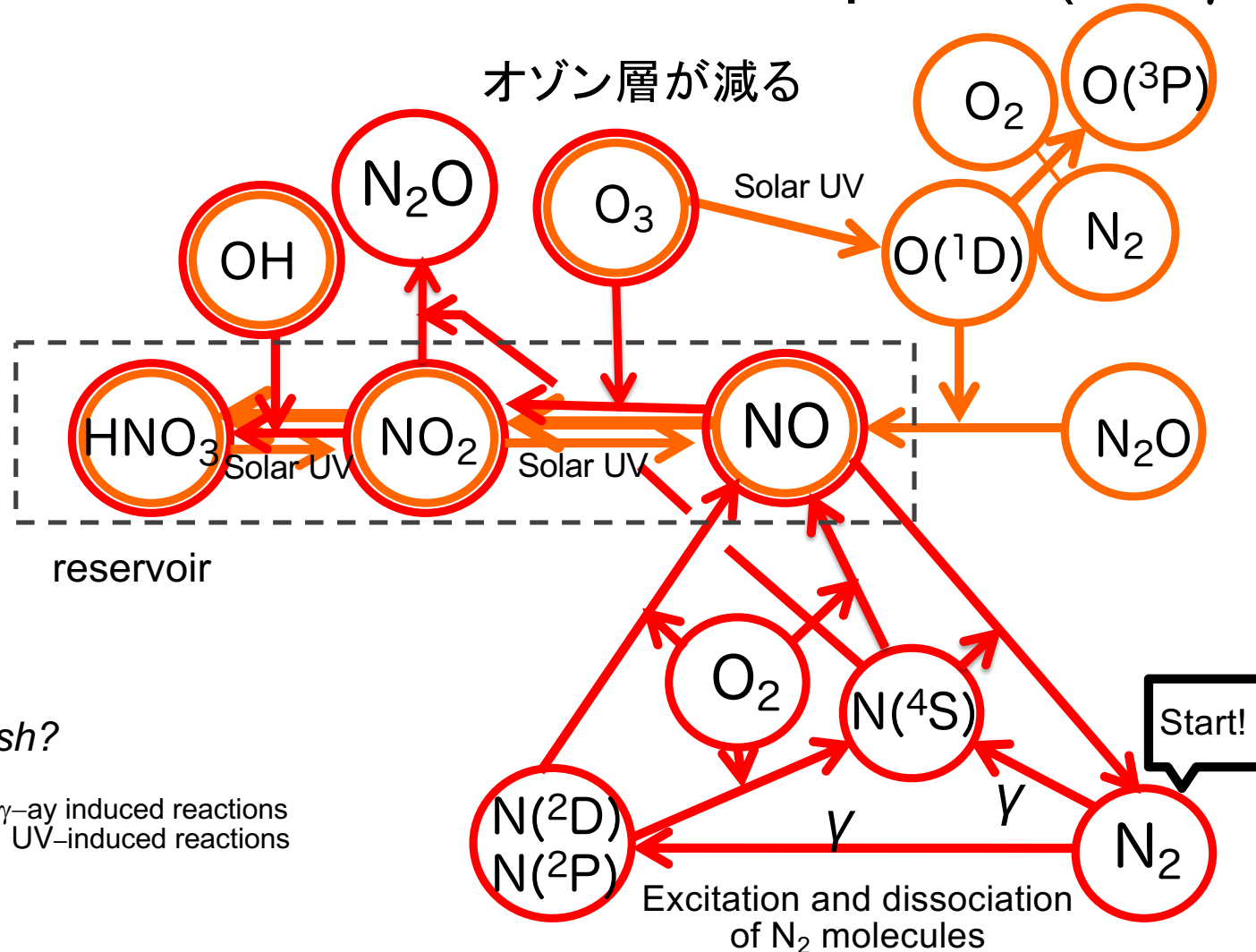
# 成層圏における窒素酸化物生成と沈降メカニズム



- 春先に $NO_3^-$ の顕著なピークあり
- 他コアで見られるような「大きな夏ピーク」なし
- DFでは、冬の「極渦」による「極域成層圏雲粒子」の脱窒が有効に働いていると考えられる
- DFコアは他の掘削サイトのコアとかなり異なる

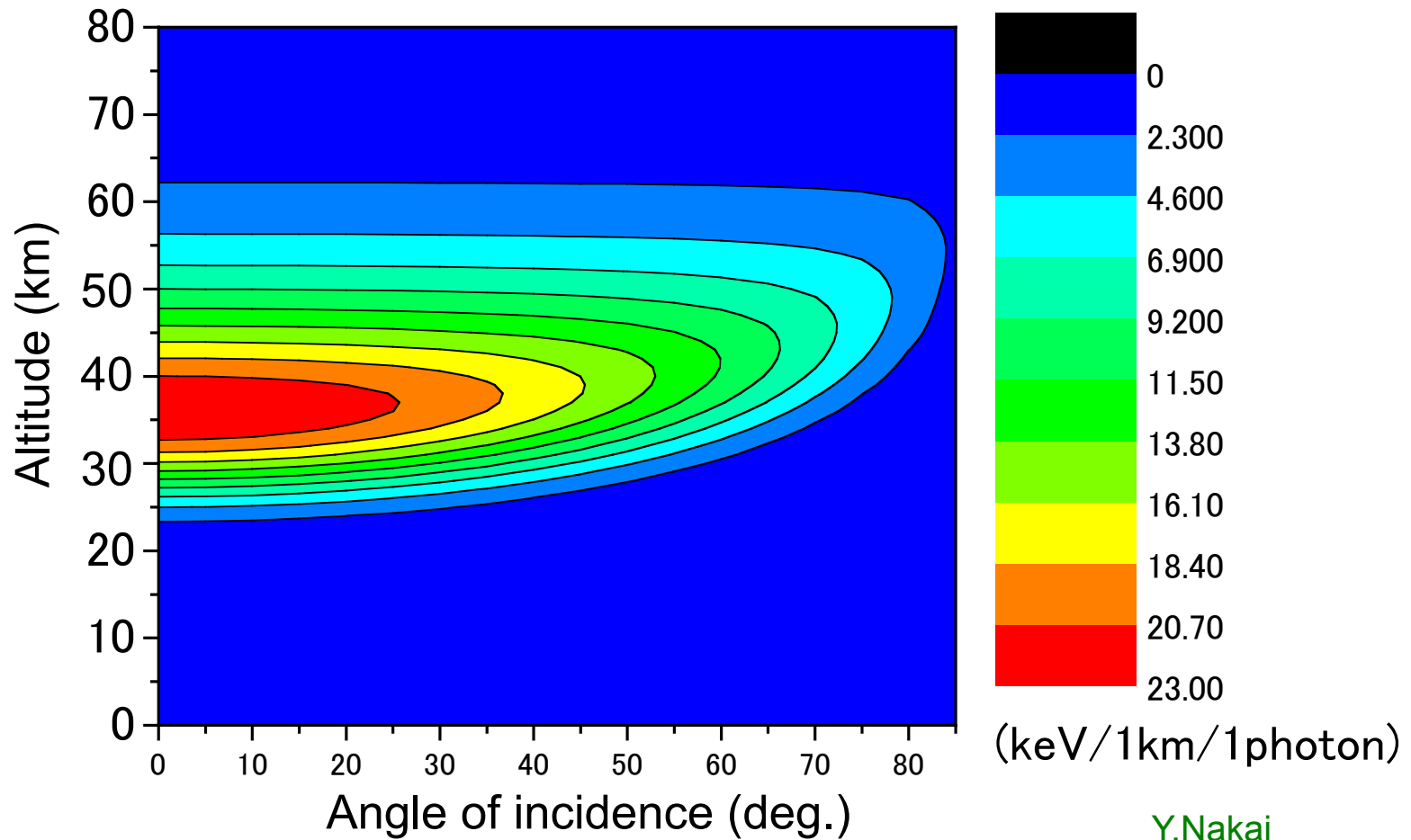
Motizuki *et al.*, submitted to PJA, Ser. B

# Chemical reaction chain in stratosphere (SN $\gamma$ -rays)



• SN UV flash?

# Energy deposition of a 500 keV photon in the atmosphere



# NOのエネルギー論(オーダー見積り)

Case of SN1006, 200 days average

atmospheric model by Brasseur et al. J. Geophys. Res. 95, 5639 (1990)

altitude (km)	5 (km)	SN1006 WDD3 [NO] (cm <sup>-3</sup> )	SUN UV [NO] (cm <sup>-3</sup> )	unit volume ratio	SN1006 WDD3 [NO] (5 km/cm <sup>2</sup> )	SUN UV [NO] (5 km/cm <sup>2</sup> )	SN/SUN [NO] ratio
25	5.00E+05	2.2.E+09	3.2E+08	6.9	1.1.E+15	1.6E+14	
30	5.00E+05	2.2.E+09	5.5E+08	4.0	1.1.E+15	2.8E+14	
35	5.00E+05	2.2.E+09	3.1E+08	7.3	1.1.E+15	1.5E+14	
40	5.00E+05	2.2.E+09	1.2E+07	193	1.1.E+15	5.8E+12	
4 bins total					4.5.E+15	6.0E+14	7.5

- Detailed estimate using 752 network reactions including ionic chemistry is ongoing

# Cassiopeia A の痕跡?

Preliminary  
Sorry!

- 1676–1684 CE:  
John Flamsteed の観測  
記録(1680)と一致  
(by Ashworth, 1980)
- 絶対年代は近傍に火山  
噴火マーカールがあり、信  
頼できる
- 他イオンや水同位体比  
との比較により、他の可  
能性(山火事、雷、気象  
の高気圧ブロッキング  
等)ではないことについ  
て確認中

SN 1006  
(AD 1006)

## SN1006とCrab SNの痕跡？

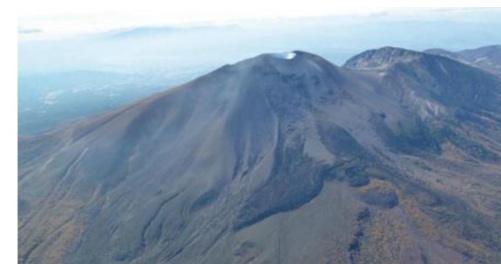
Crab Nebula  
(AD 1054)

NASA/ESA

Preliminary  
Sorry!

- 精度、再現性OK。2つのスパイクが約200年間に発生する確率 < 1%
- 太陽11年周期と2つの超新星候補スパイクは両立している。
- 近傍に噴火マーカーがない=>絶対年代決定が要(次スライド参照)

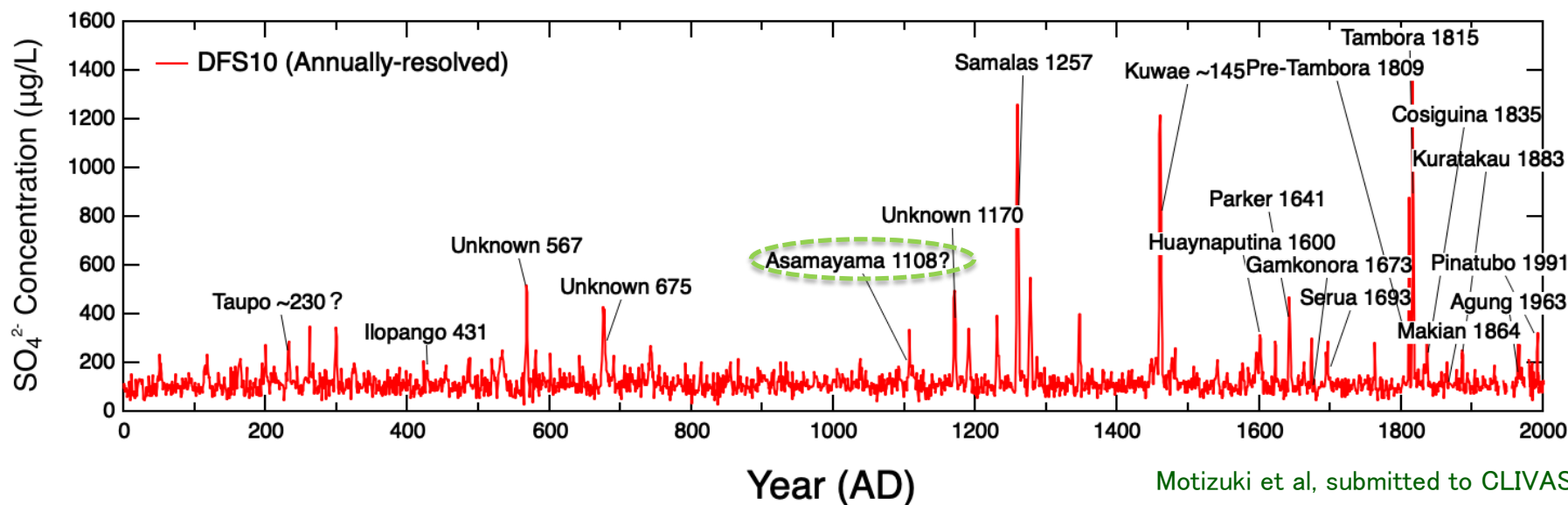
# 浅间山巨大噴火(1108)の痕跡？



浅间山全景 北東側上空から 釜山火山口(中央上)、鬼押出溶岩(中央手前及び右下)、黒斑山(右奥)  
2010年11月2日 気象庁撮影

- 浅间山の歴史的噴火(1108 AD, VEI=5: huge, stratospheric eruption)
- グリーンランドアイスコアからの提案(Guillet *et al.*, 2020)
- DF01コア中の火山灰(テフラ)粒子の組成を既知の浅间山テフラ組成と比較予定(2023)

## History of volcanic eruptions in the past 2,000 years



- Crab SN候補スパイク(1054)を同定するための重要なタイムマーカーになる

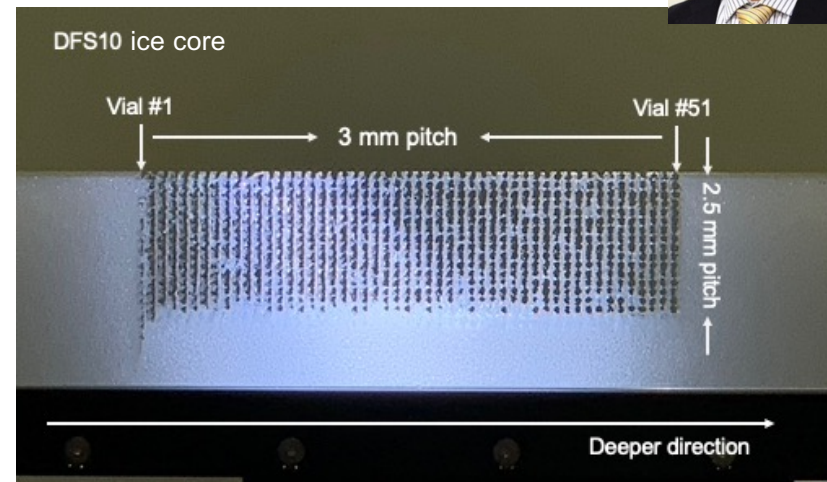
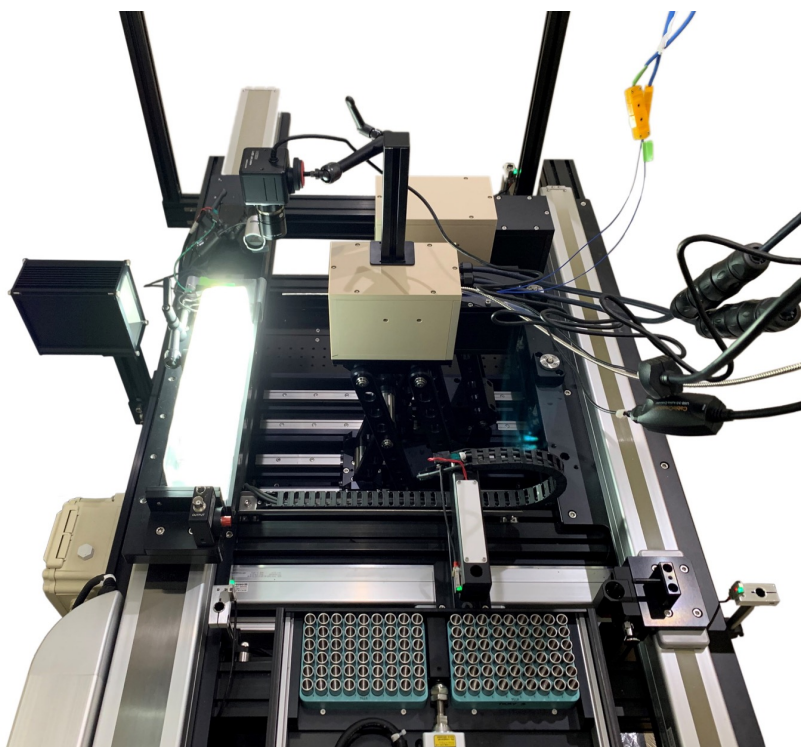
# アイスコアファクトリー計画



Collaboration  
with Laser Team



## Laser Melting Sampler (LMS)



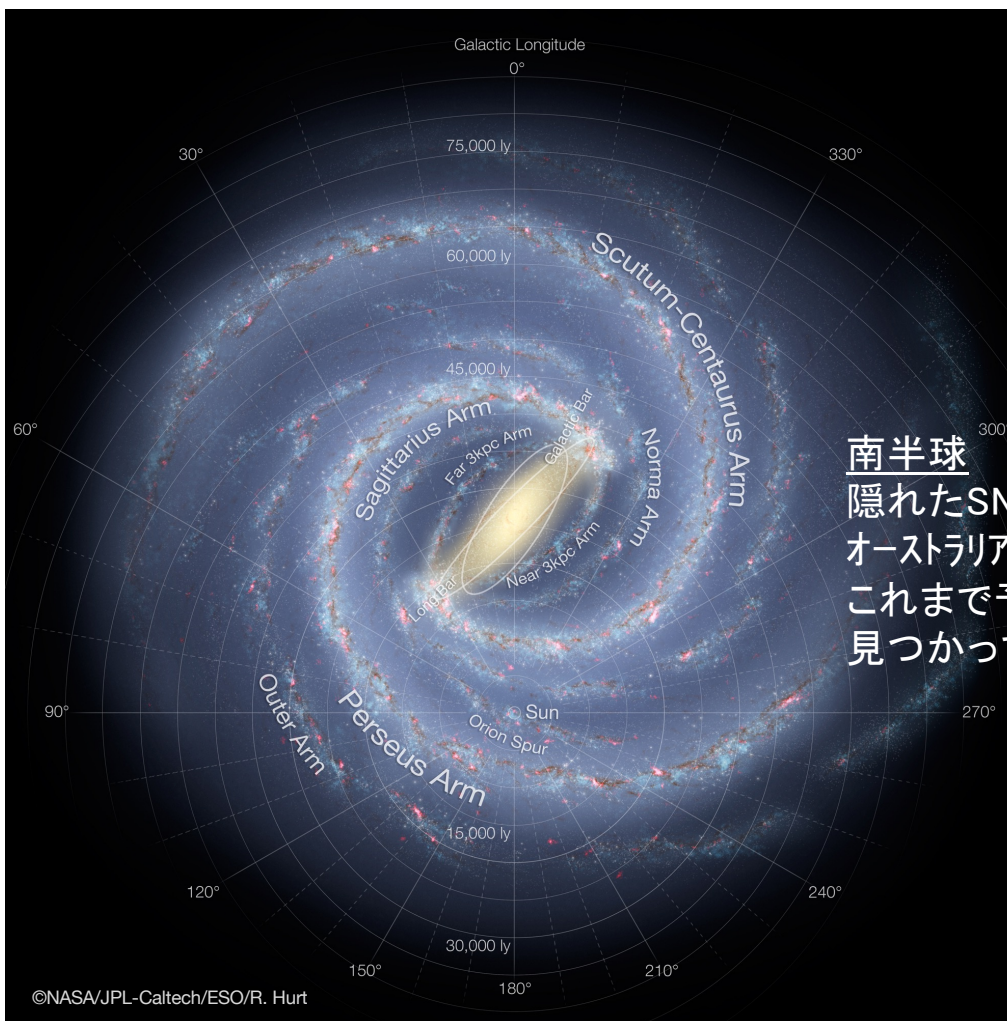
- World's first sampling device
- Attained 3mm-resolution of analyses
- The LMS system can provide  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ; anions (10 species); cations (5),  $^{15}\text{N}$ ,  $^{32,33,34}\text{S}$ , etc.
- 5 years were required for 2,000 years of ice core analyses by hand segmentation → 30 working days

Motizuki *et al.*, submitted to JOG



# 我々は我々の天の川銀河をまだまだ知らない

Nature, Jan. 26, 2023



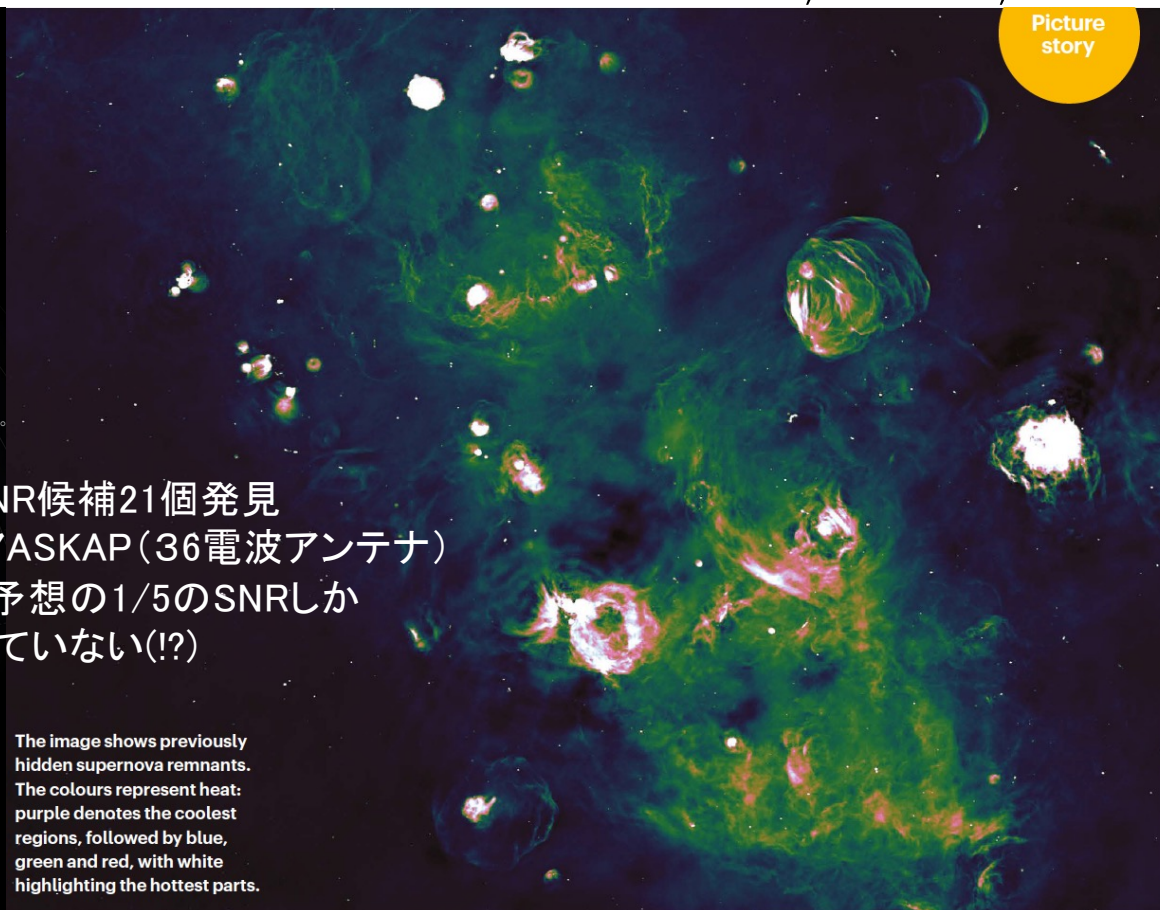
南半球  
隠れたSNR候補21個発見  
オーストラリアASKAP(36電波アンテナ)  
これまで予想の1/5のSNRしか  
見つかっていない(!?)

The image shows previously hidden supernova remnants. The colours represent heat: purple denotes the coolest regions, followed by blue, green and red, with white highlighting the hottest parts.

**Star graveyard revealed in super-clear image of the Milky Way**

based in Penticton and is Ball's supervisor. "This image was the first test that we did, and it worked spectacularly well," he says. The work has yet to be published.

Picture story



# まとめ

- 1) 海底クラスト、樹木年輪などで過去の超新星爆発の報告が続いている
- 2) ドームふじアイスコア中の $\text{NO}_3^-$ 濃度から、太陽周期と思われる11年, 22年, 約90年の周期の同時検出に成功 (アイスコアで世界初):  
超新星シグナルの痕跡の検証へ向けてのマイルストーン
- 3) 11年周期は深層コアの年代軸を与える「ものさし」の役目をする  
— 年代だけでなく、SN候補スパイクの妥当性や発生頻度解析にプラス
- 4)  $\text{NO}_3^-$  SN候補スパイク検証が進行中: CasA, SN1006, Crab SN等
- 5) 進行中のプロジェクト
  - 「アイスコアレーザー溶融(LMS)装置」を使った自動サンプリング
  - $\text{NO}_3^-$  中の同位体比( $^{15}\text{N}$ ,  $^{18}\text{O}$ ) の同位体分別の理解 (理論、分析)
  - 3次元化学気候モデルによるSNシミュレーション