

超高層大気分野における スパコンの活用と期待

深沢 圭一郎

総合地球環境学研究所 基盤研究部 情報・企画部門

自己紹介

所属: 総合地球環境学研究所 基盤研究部 情報・企画部門

(地球研は大学共同利用機関法人人間文化研究機構の構成機関で、
総研大の総合地球環境学コース担当です)

履歴: 名古屋大学 (惑星磁気圏+スパコン)

→ 情報通信研究機構 (宇宙天気+スパコン)

→ 九州大学 (惑星磁気圏+スパコン)

→ 京都大学 (ほぼスパコン+a)

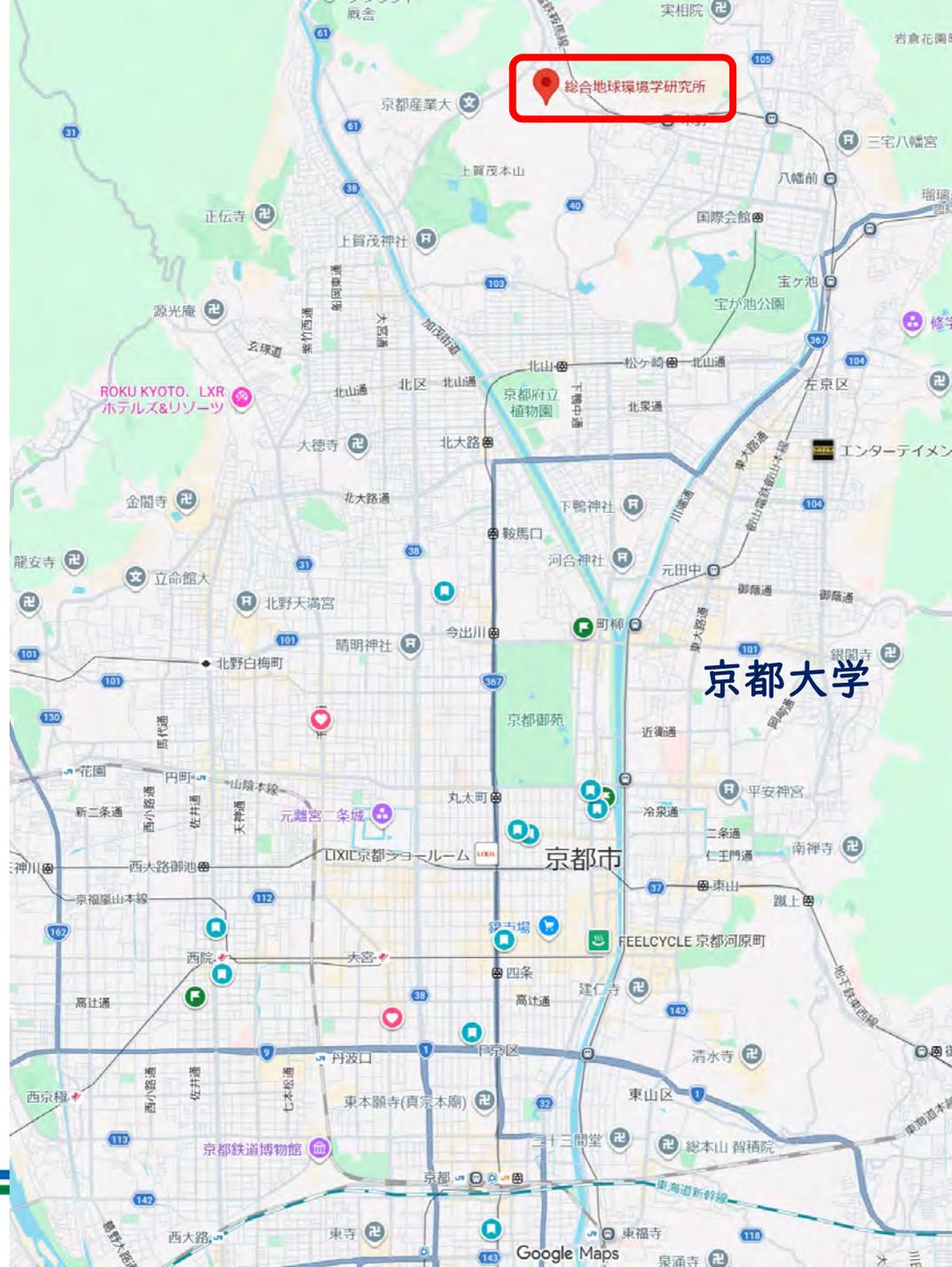
→ 地球研 (情報基盤+超高層大気シミュレーション+a)

専門: 高性能計算 (HPC)、惑星磁気圏シミュレーション、数値計算、省電力、IoT、野生ウマの行動シミュレーション。

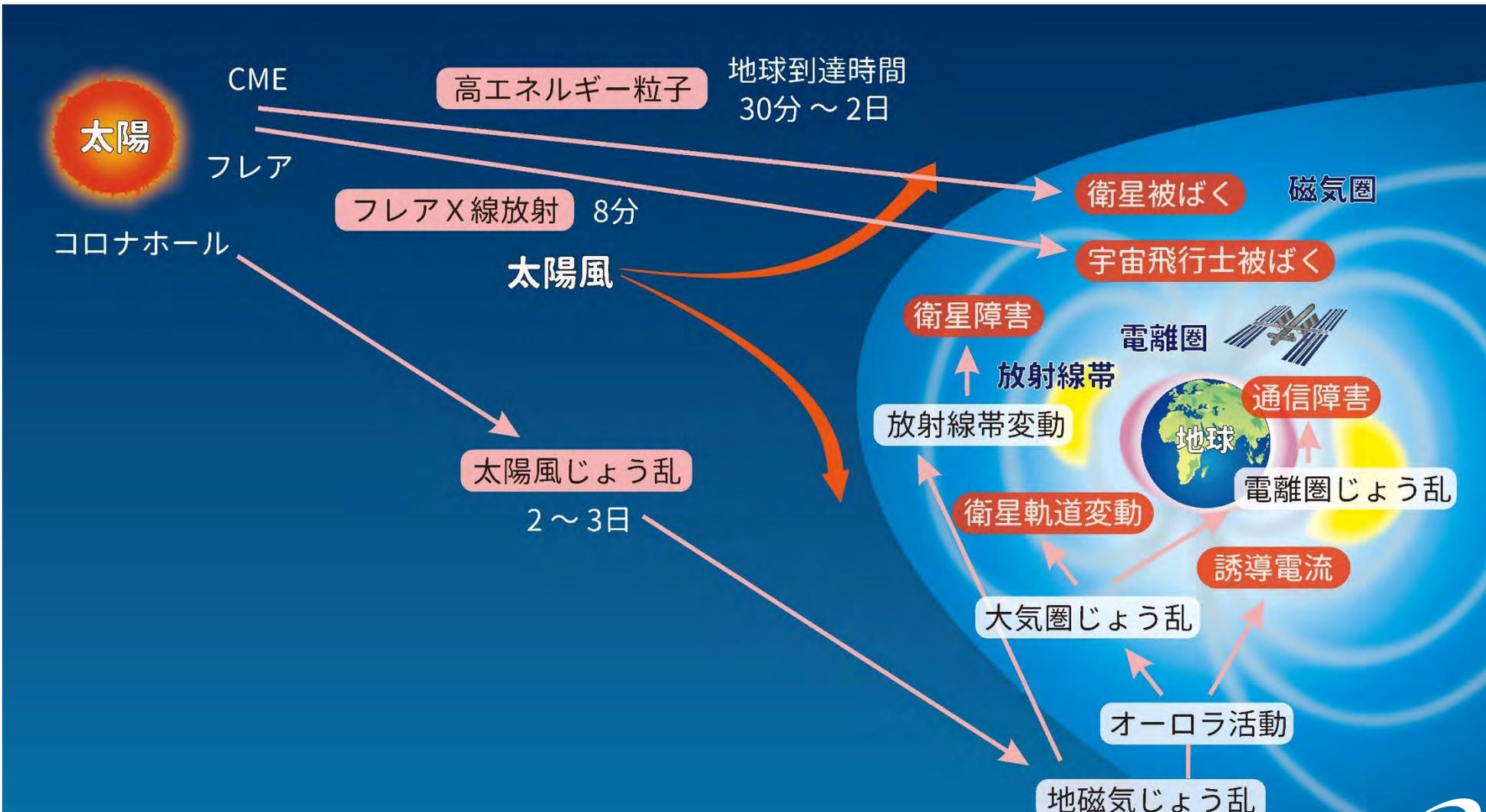
地球研



地球研



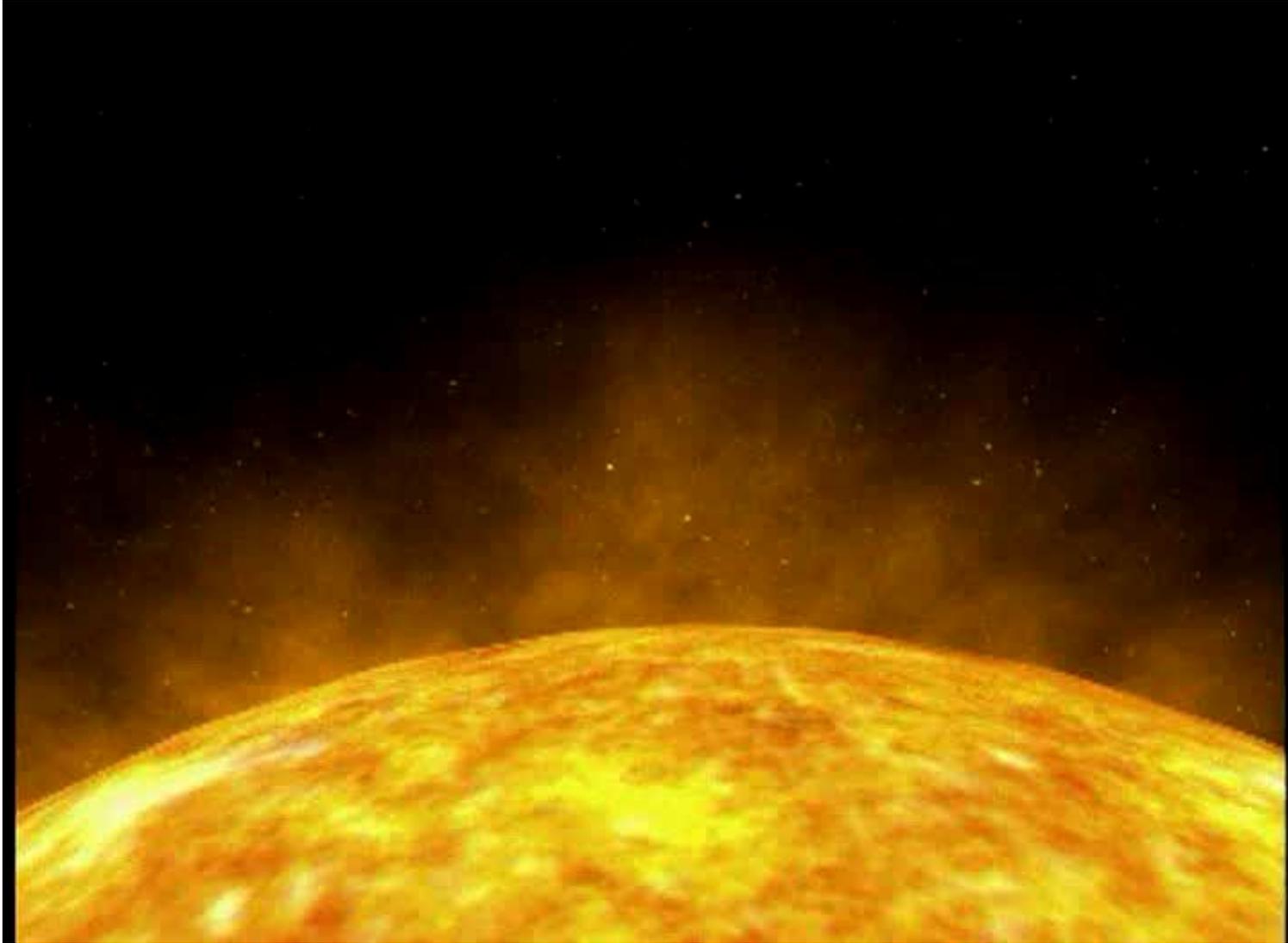
超高層大気分野とは？



宇宙天気現象の発生と障害

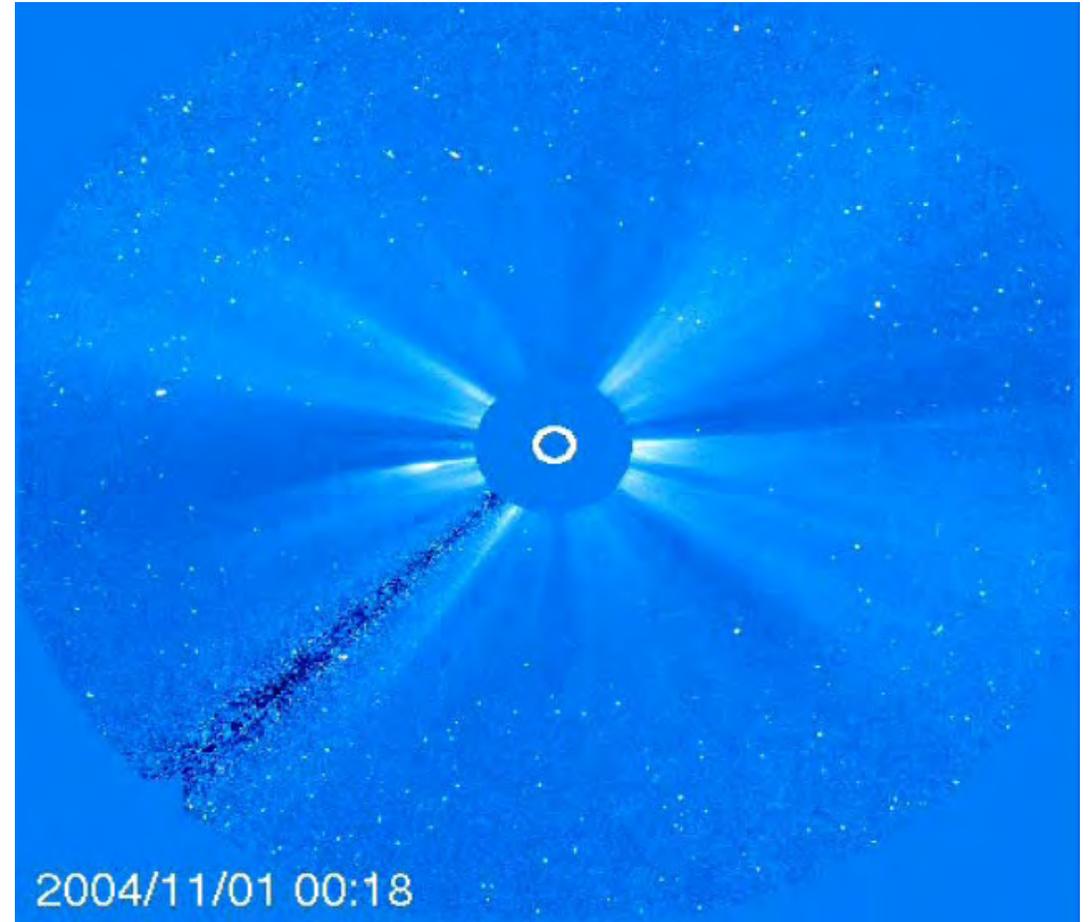
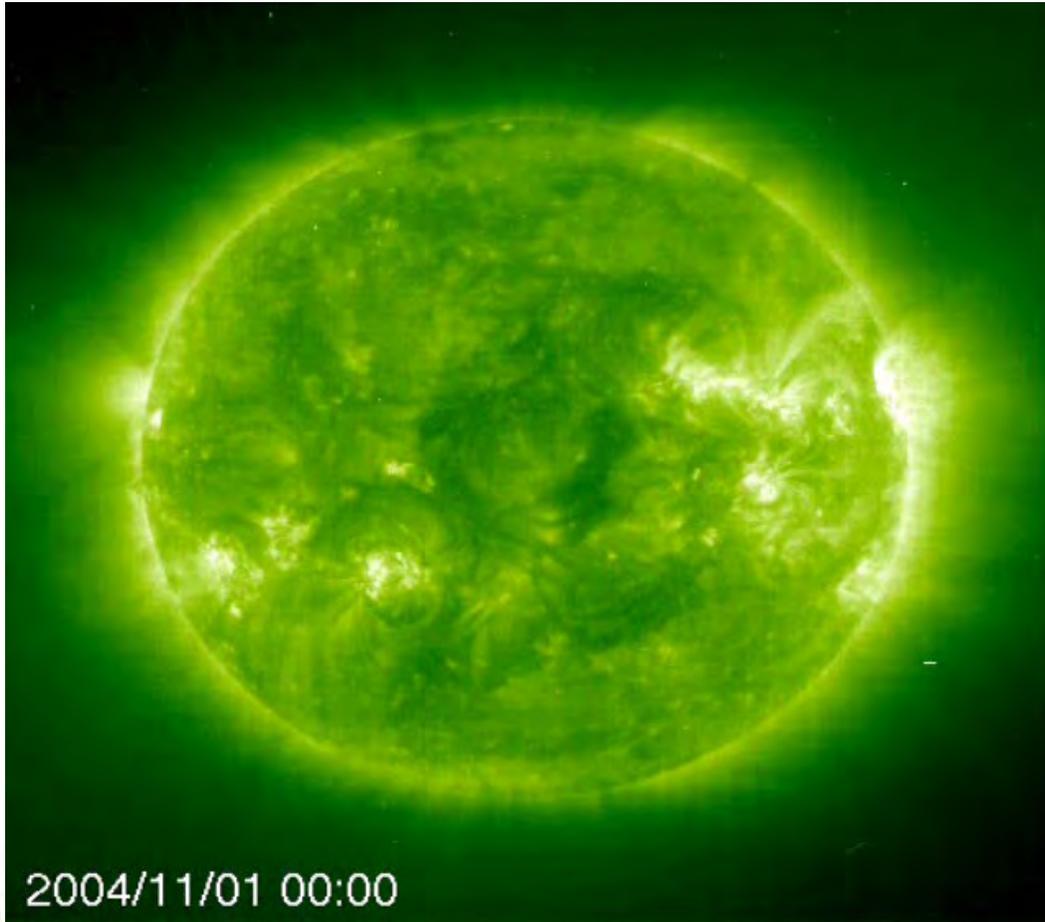


宇宙天気のプロセス



宇宙天気之源

Solar Explosions

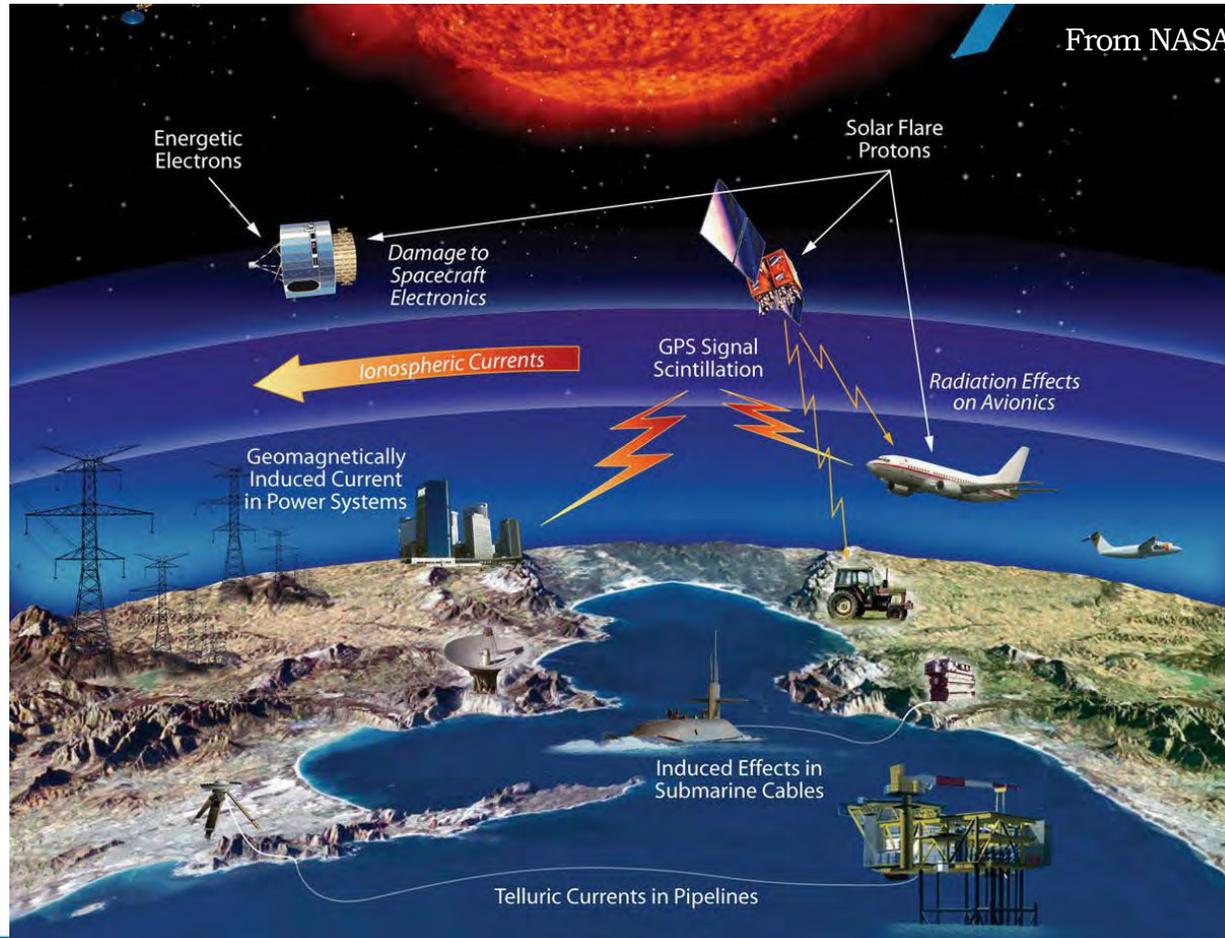


Aurora in Iceland



Impacts of Space Weather

Communication and GPS Failures, Satellite Damage, Power Grid Destruction



宇宙天気起因するアクシデント

- 1859.09 First solar flare observed → Largest on record, with **aurora visible in Hawaii**
- 1909.09 **Long-distance telegraphic service in Japan and abroad disrupted** due to geomagnetically induced currents in Japan.
- 1921.05 New York **signaling system fails; fire** at Swedish telephone office.
- 1940.03 **Power outages** in various parts of the U.S. and Canada.
- 1958.02 **Power outages** in various parts of the U.S. and Canada.
- 1972.08 **Transmission and telegraph network failure** in wide areas of the North American continent → U.S. mines explode on their own in Vietnam.
- 1989.03 A major **power outage** in Canada due to a **power transmission system failure**.
- 1994.01: Attitude **control failure** in communications satellites Anik E1 and E2.
- 1994.02 BS-3a communications **satellite in Japan malfunctions**, interrupting live coverage of the Winter Olympics jumps.
- 1997.01 Communications **satellite Telstar 401 ceased functioning due to discharge**.
- 2000.07 Japanese X-ray astronomy **satellite ASCA suffered an attitude control failure** due to atmospheric drag and subsequently ceased operations.
- 2002.04 Japan's **Mars explorer “Nozomi” suffered a malfunction in its communication and power supply systems**.
- 2003.10 Japan's Earth observation **satellite Midori-2 stopped functioning due to a discharge failure**, which prevented it from obtaining power from its solar cells.
- 2003.10 A geomagnetic storm caused **a power outage in Sweden due to a failure** in the power transmission system.

In 2022.02, SpaceX launched 49 Starlink satellites on Falcon 9, but **up to 40 of them re-entered the atmosphere due to geomagnetic storms**.

直近の宇宙天気による事故

Failure of A320 by High Energy Particle

On 2025/10/30, a JetBlue A320 **suddenly lowered its nose without the pilot doing anything**, and 12 passengers were hurt.

On 2025/11/28, Airbus asked airlines to stop using their A320s since **a strong sunlight could mess up important data for flight control**. This affected 6,000 A320s.

The problem was caused by the flight control computer. The computer processes information from sensors and calculates the position of the control surfaces. **If a value is corrupted during this calculation due to a bit flip, it is output incorrectly.**

A320 Family precautionary fleet action | Airbus

<https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2025-11-airbus-update-on-a320-family-precautionary-fleet-action>



宇宙天気の現場：地球磁気圏

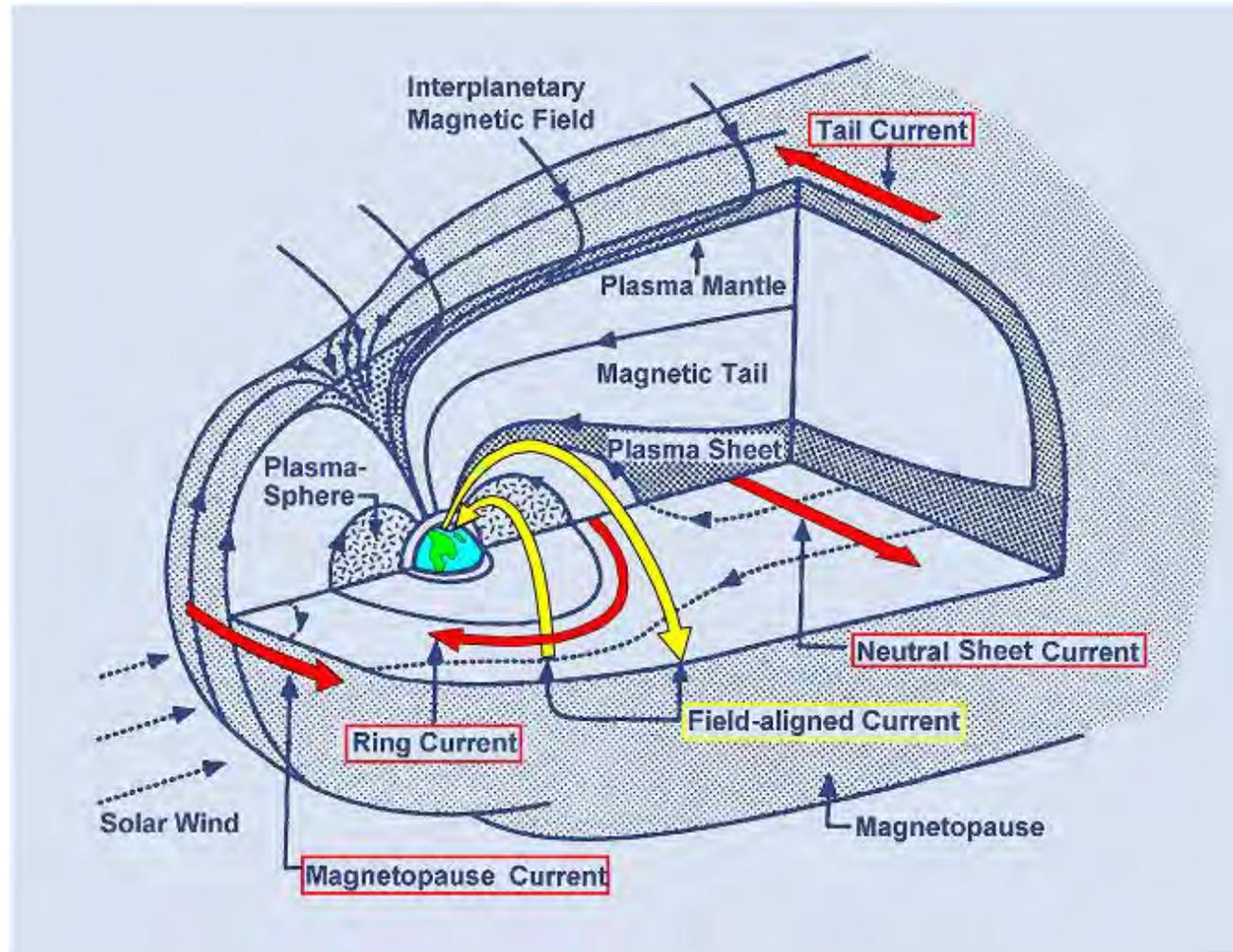


Fig. A sketch of the magnetosphere (modified from Kivelson and Russel [1995])

磁気圏シミュレーションモデル

Vlasov equation (collisionless Boltzmann equation)

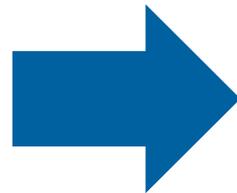
$$\frac{\partial f_s}{\partial t} + \vec{v} \frac{\partial f_s}{\partial \vec{r}} + \frac{q_s}{m_s} (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \frac{\partial f_s}{\partial \vec{v}} = 0$$

$$*f(x, y, z, v_x, v_y, v_z, t)$$

*3,000⁶=5,832EBのメモリが必要

Maxwell equations

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \end{cases}$$



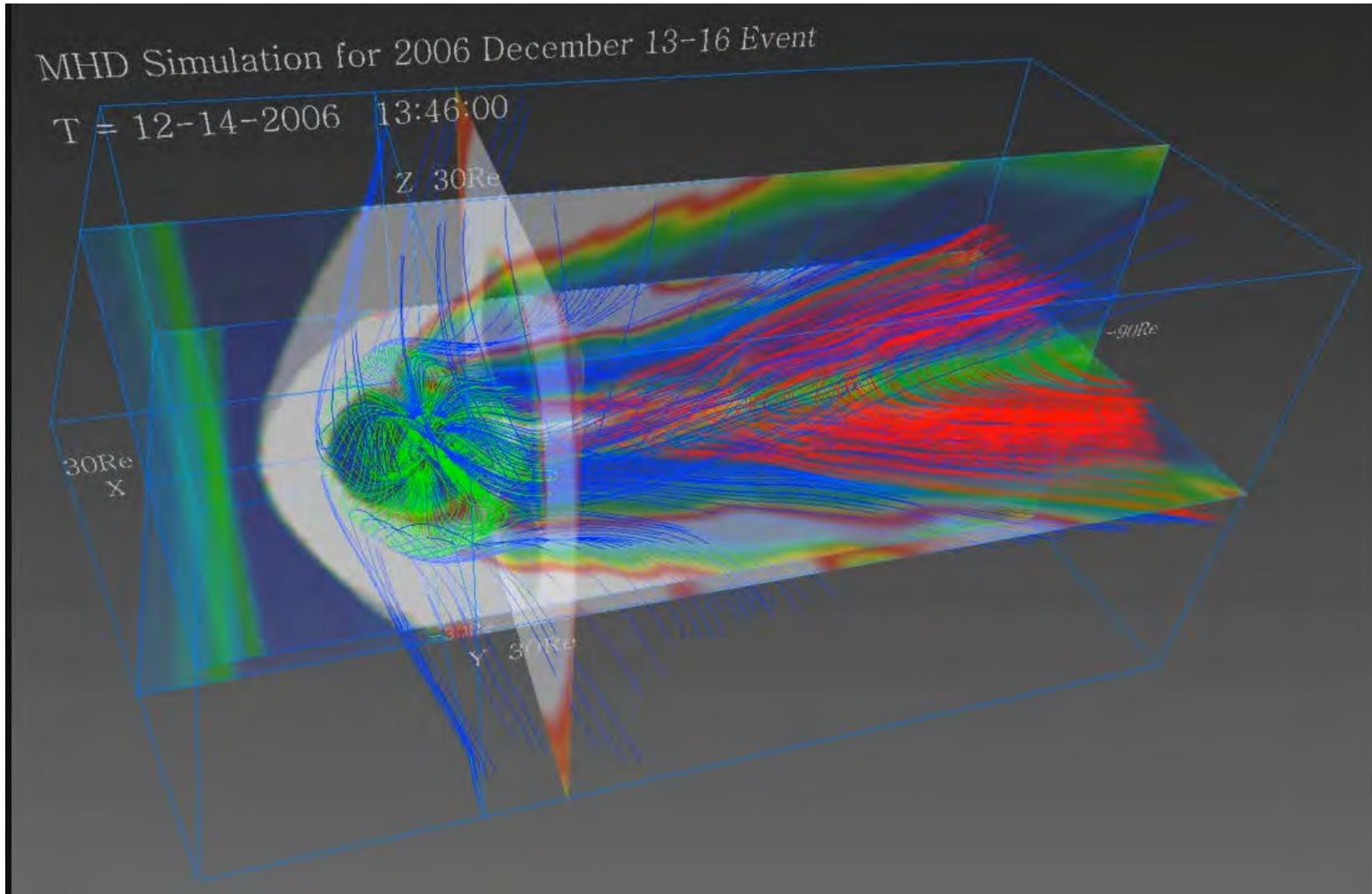
MHD equations

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\vec{v} \rho) + D \nabla^2 \rho \\ \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{1}{\rho} \vec{J} \times \vec{B} + g + \frac{\Phi}{\rho} \\ \frac{\partial P}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) P - \gamma P \nabla \cdot \vec{v} + D_p \nabla^2 P \\ \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{v} \times \vec{B}) + \eta \nabla^2 \vec{B} \end{cases}$$

$$* \vec{J} = \nabla \times (\vec{B} - \vec{B}_d)$$

*3,000³×8変数=1.7TBのメモリ

地球磁気圏シミュレーション例



最近の宇宙天気イベントシミュレーション

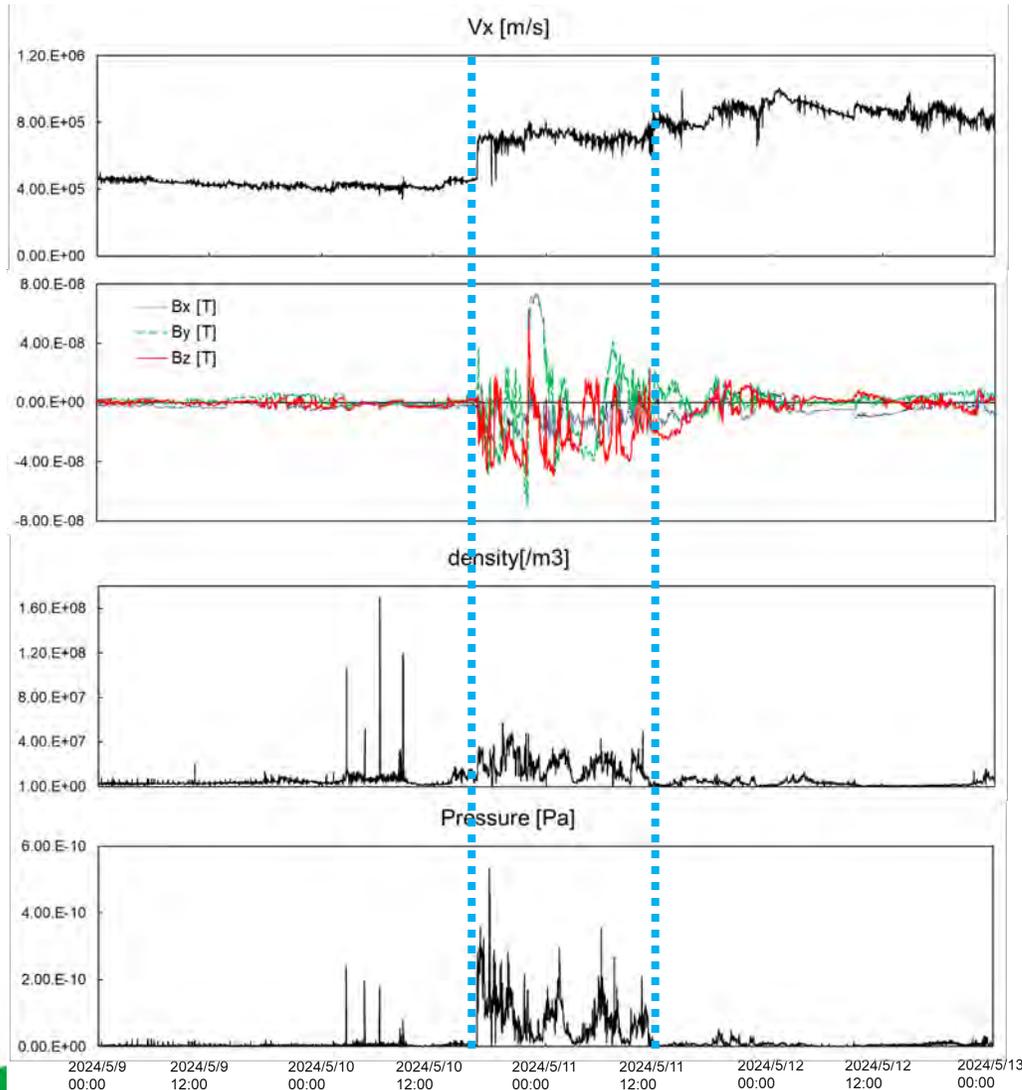
2024年5月に起きた巨大な太陽フレアイベント
高緯度のオーロラだけでなく低緯度オーロラが観測された。
地球に対する影響が非常に大きかったと考えられる。

一方で、地球磁気圏は可視では確認
できず、3次元的全体構造の理解が
難しい。
→シミュレーションの出番

aは青森から撮影されたオーロラ写真(KAGAYA氏撮影)。b
は北海道、cは中部、dは東北から撮影された写真(市民提供)。
<https://www.nipr.ac.jp/info2024/20241031.html>



MHDシミュレーションに利用した太陽風



太陽風: Discoverの1分値

(<https://lasp.colorado.edu/space-weather-portal/>)

期間: 2024/5/9 0:00~2024/5/13 0:00

5/10 17時前 (16時35分頃)

- 大規模変化が始まる

5/11 12時頃

- 磁場変動は落ち着くが速度は速い (800km/sに近い)。

MHDシミュレーション設定

計算サイズ：602 × 406 × 400 (=2.9GB)

※短期間で大量のデータ出力のため小さいサイズ

解像度：0.2Re

内側境界：3.5Re

Sampling time (データ出力頻度)：5min (約125secで計算可能)

計算期間：2024/5/9 0:00～2024/5/13 0:00 (4日間)

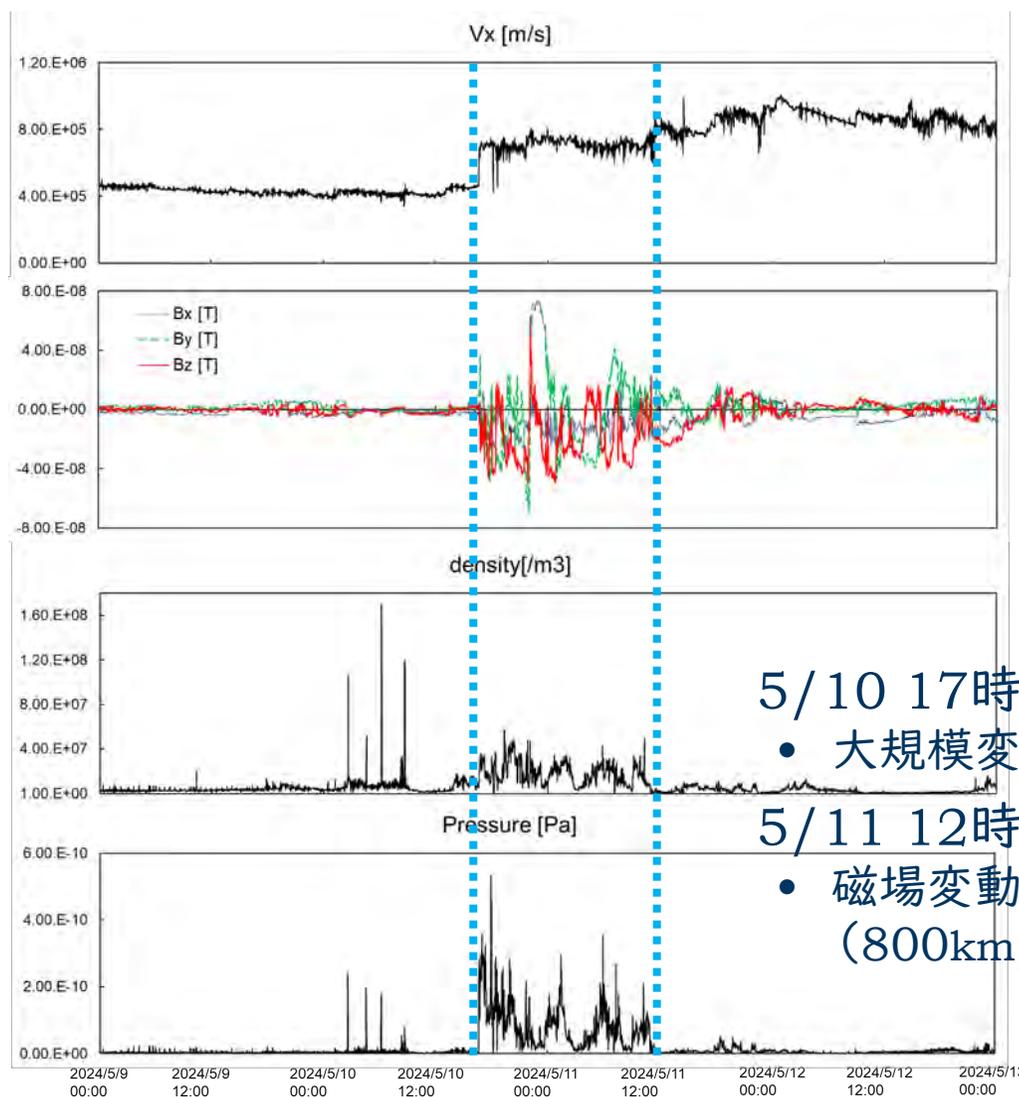
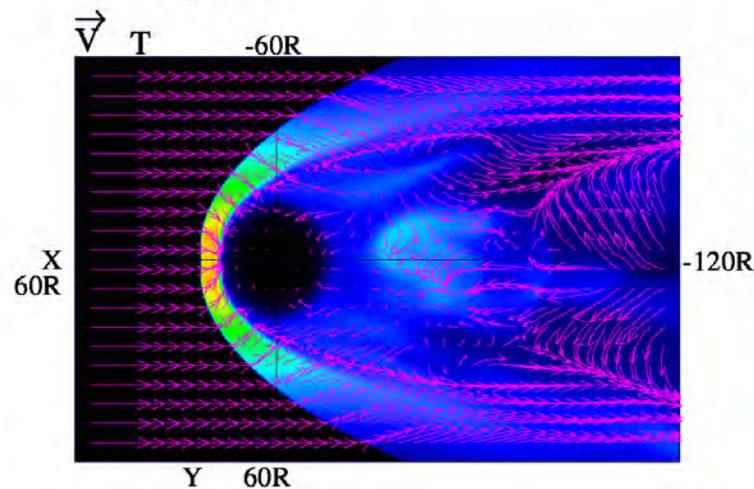
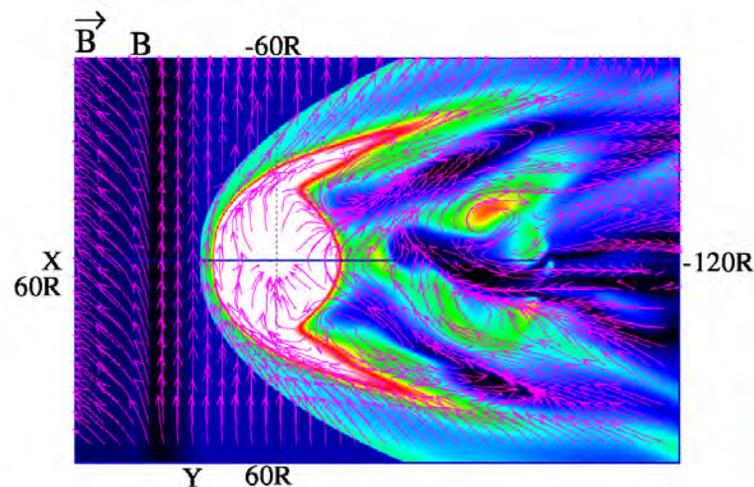
入力太陽風：Discoverの1分値

初期状態：2024/5/9 0:00の太陽風データで80分間計算

データ数：1152個 (=3.3TB)

MHDシミュレーション結果

Terrestrial Magnetosphere
2024/05/09 00:05



5/10 17時前(16時35分頃)

- 大規模変化が始まる

5/11 12時頃

- 磁場変動は落ち着くが速度は速い(800km/sに近い)。

磁気圏界面や衝撃波面



気象のようにリアルタイムで計算が必要になってきており、スパコンのようなデータ出力も高速で解析が行える環境が必須。

研究レベルだと、(Vlasovは特に)まだまだweak scalingな分野。

変化する入力とその時の場の状況が非線形に相互作用するため、サロゲートモデルはかなり難しい分野。

物理変数の多い三次元モデルのため、解析でAI活用が次ステップと想定。

止軌道
5.5Re

衛星あらせは、5Re程度で磁気圏外に出たことを確認

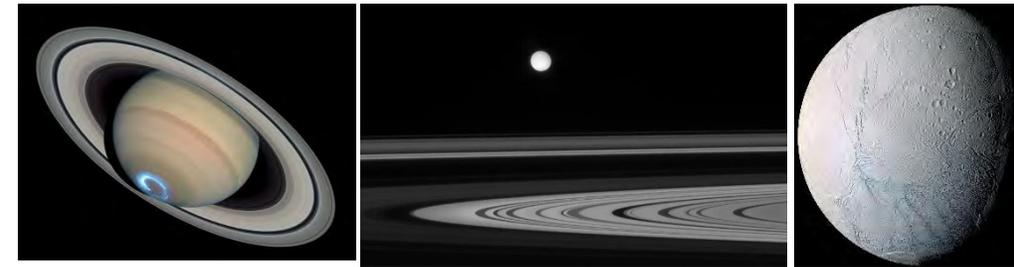
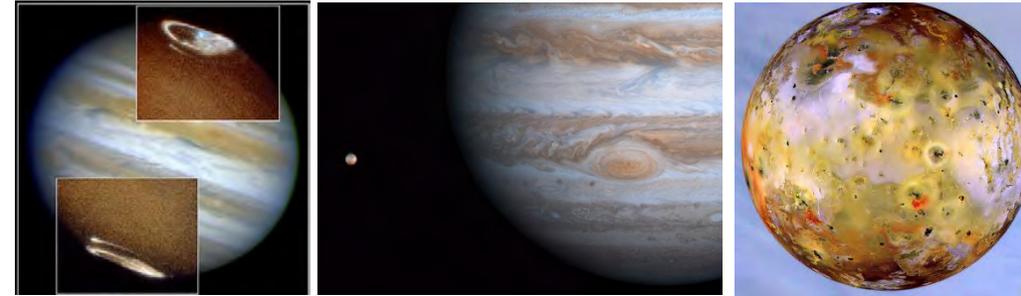
(https://x.com/ISAS_JAXA/status/1793190062424797448)



他の磁化惑星

地球と木星、土星の特徴比較

	Jupiter	Saturn	Earth
Magnetic field [nT]	420,000	21,000	31,000
Direction of Mag.	↓	↓	↑
Rotation speed [hr]	10	10.65	24
Plasma source	Io, Ionosphere	Enceladus, Ionosphere	Ionosphere
Radius [km]	71,492	60,268	6,378
From Sun [A.U.]	5.2	9.55	1



木星は巨大な磁場と大量のプラズマ源を持ち、高速に自転する。
土星は小さな磁場と大量のプラズマ源を持ち、高速に自転する。
地球は小さな磁場と少量のプラズマ源を持ち、ゆっくり自転する。

木星磁気圏シミュレーション (2005年頃)

Periodic plasma ejection

Observations

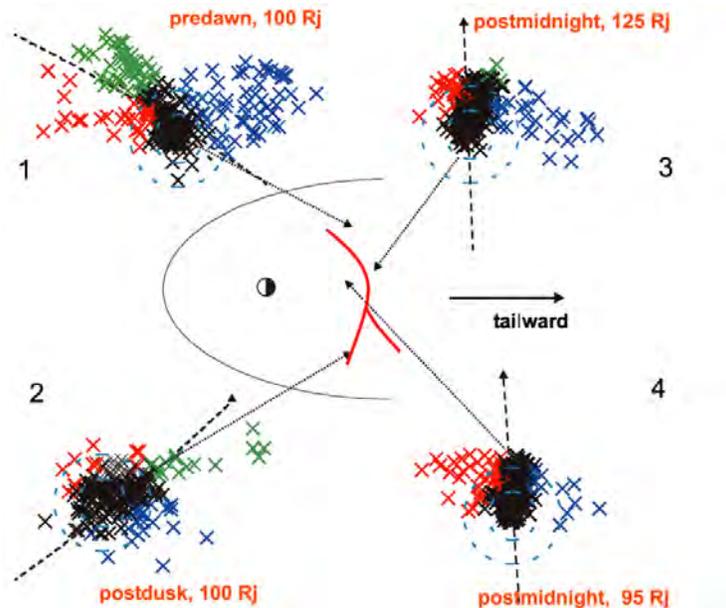


Fig. Distribution of flow directions from Galileo [Woch *et al.*, 2002]

Simulations

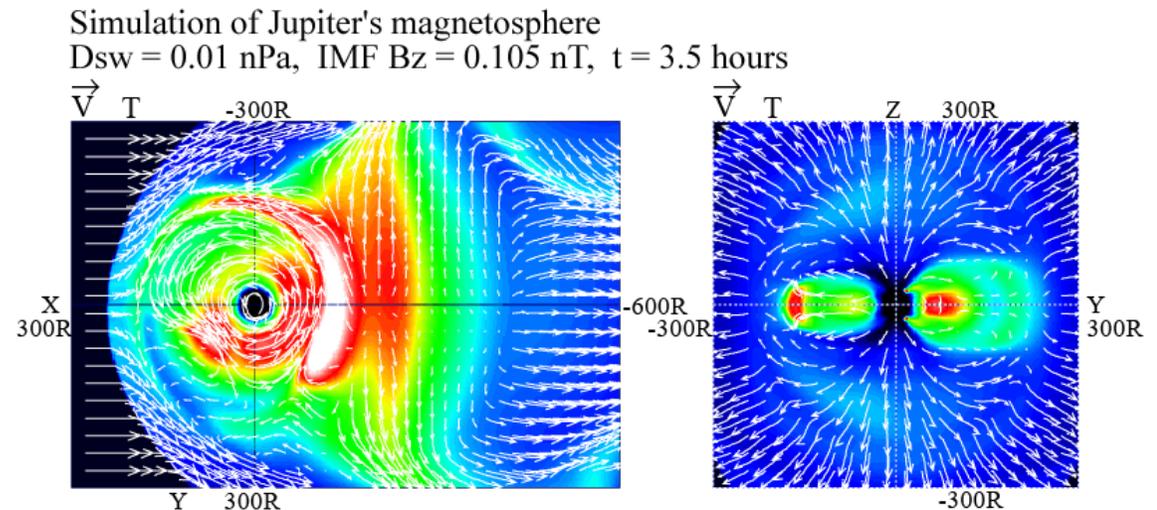


Fig. Plasma ejection in the Jovian magnetosphere from simulation [Fukazawa *et al.*, *GRL*, 2005]

Simulation out put size 600×400×200=1.5GB

木星磁気圏シミュレーション (2010年頃)

Periodic plasma ejection

Observations

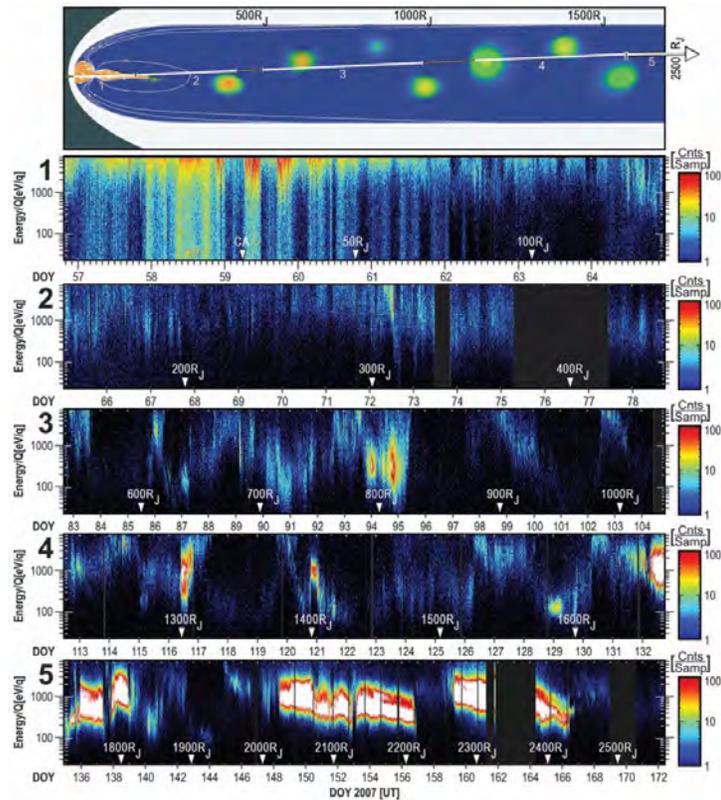


Fig. Plasma observations from just after NH's inbound crossing of Jupiter's. [McComas et al., 2007]

Simulations

Distant tail of Jovian Magnetosphere
 $B_z = 0.105$ nT $D_{sw} = 0.01125$ nPa $t = 1323$ hours

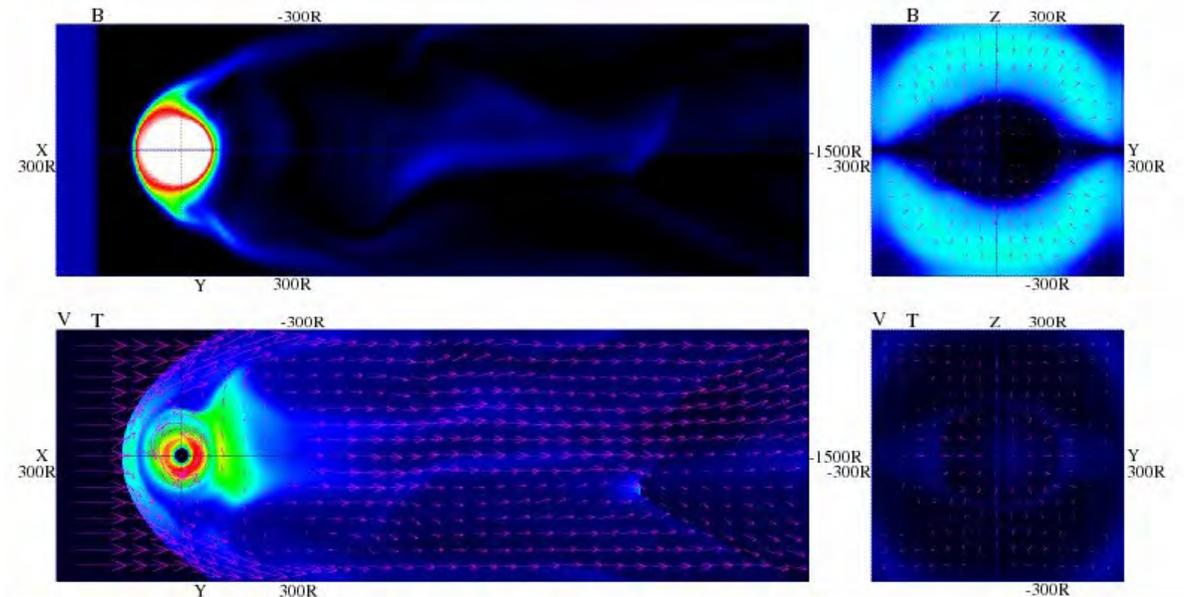
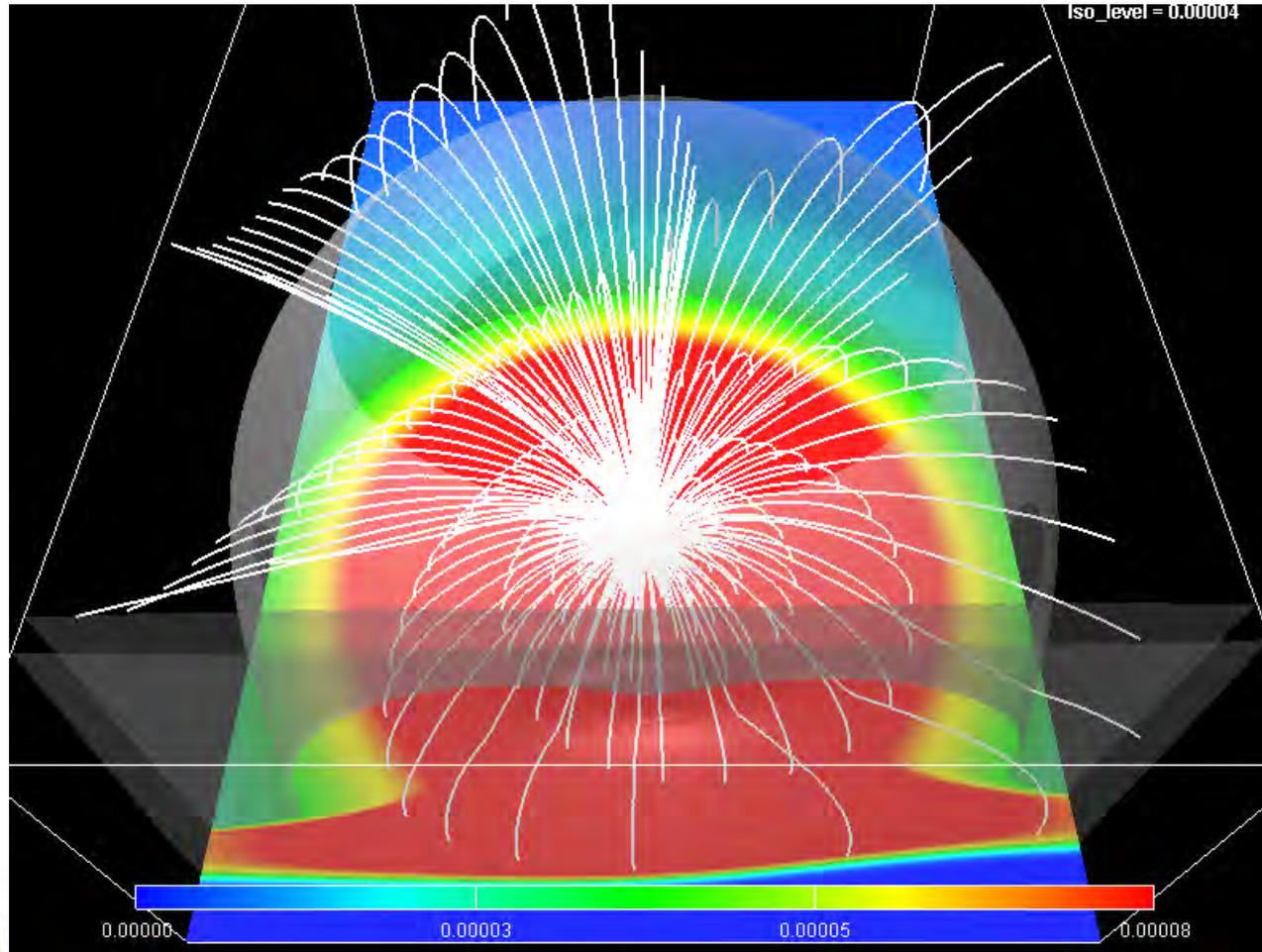


Fig. Periodic plasma ejection in Jovian magnetotail
[Fukazawa et al., JGR, 2010]

Simulation output size 1200×400×400=12GB

土星磁気圏シミュレーション (2012年頃)

Vortex configuration in the Saturn's Magnetosphere



Simulation out put size
1800×1200×600=40.5GB

Fig. Magnitude of magnetic field on the equatorial plane of Kronian magnetosphere [Fukazawa et al., JGR, 2012]

土星磁気圏シミュレーションからオーロラ計算

極域沿磁力線電流の構造

沿磁力線電流はオーロラの輝きと関連がある
細かな沿磁力線電流の強い分布が見える。

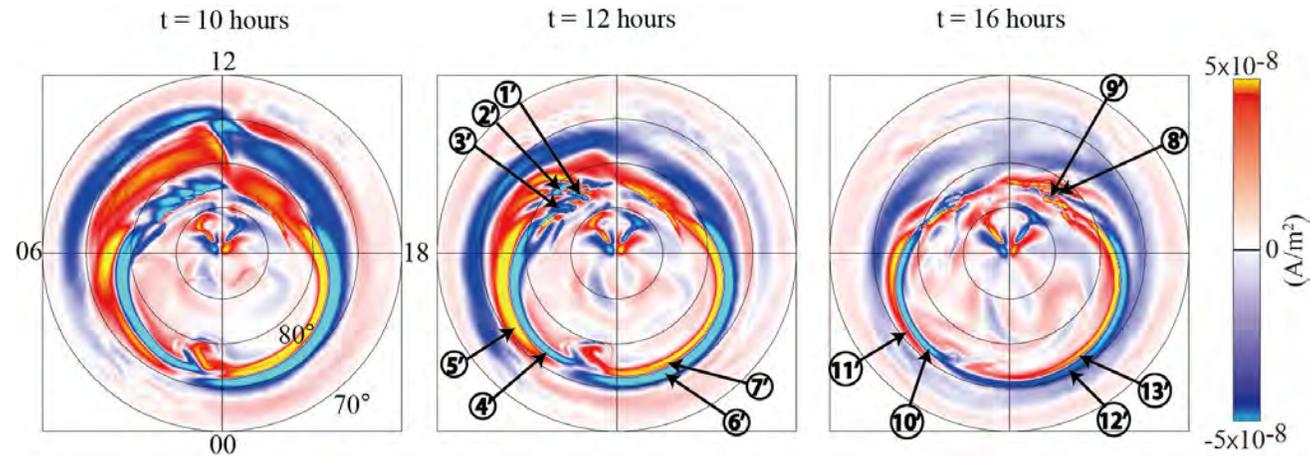


Fig. Configuration of FACs in the Kronian magnetosphere
[Fukazawa et al., JGR, 2012]

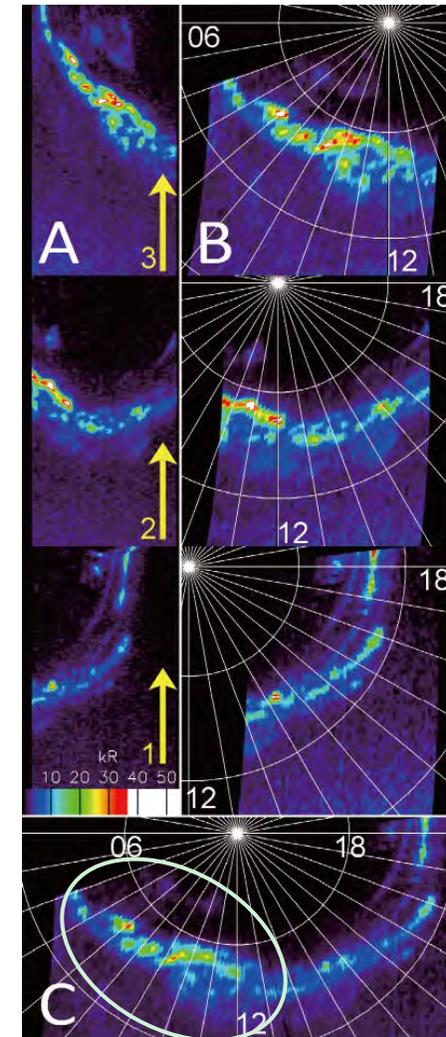


Fig. Pseudoimages obtained with the FUV channel of the Cassini-UVIS spectro-imager on DOY 239 (26 August) of 2008. [Grodent et al., 2011]

高解像度木星磁気圏MHDシミュレーション

20年前と比べて**10,000倍**大きなシミュレーションが可能

Computer resources

- NEC SX-AT (30A) @ Tohoku U
- 4.91TFlops/VE (16 cores) + 96GB HBM2e (2.45TB/s)
- 128 VEs (2048 cores) is used
→VE is good to use for application user due to no changing to the code

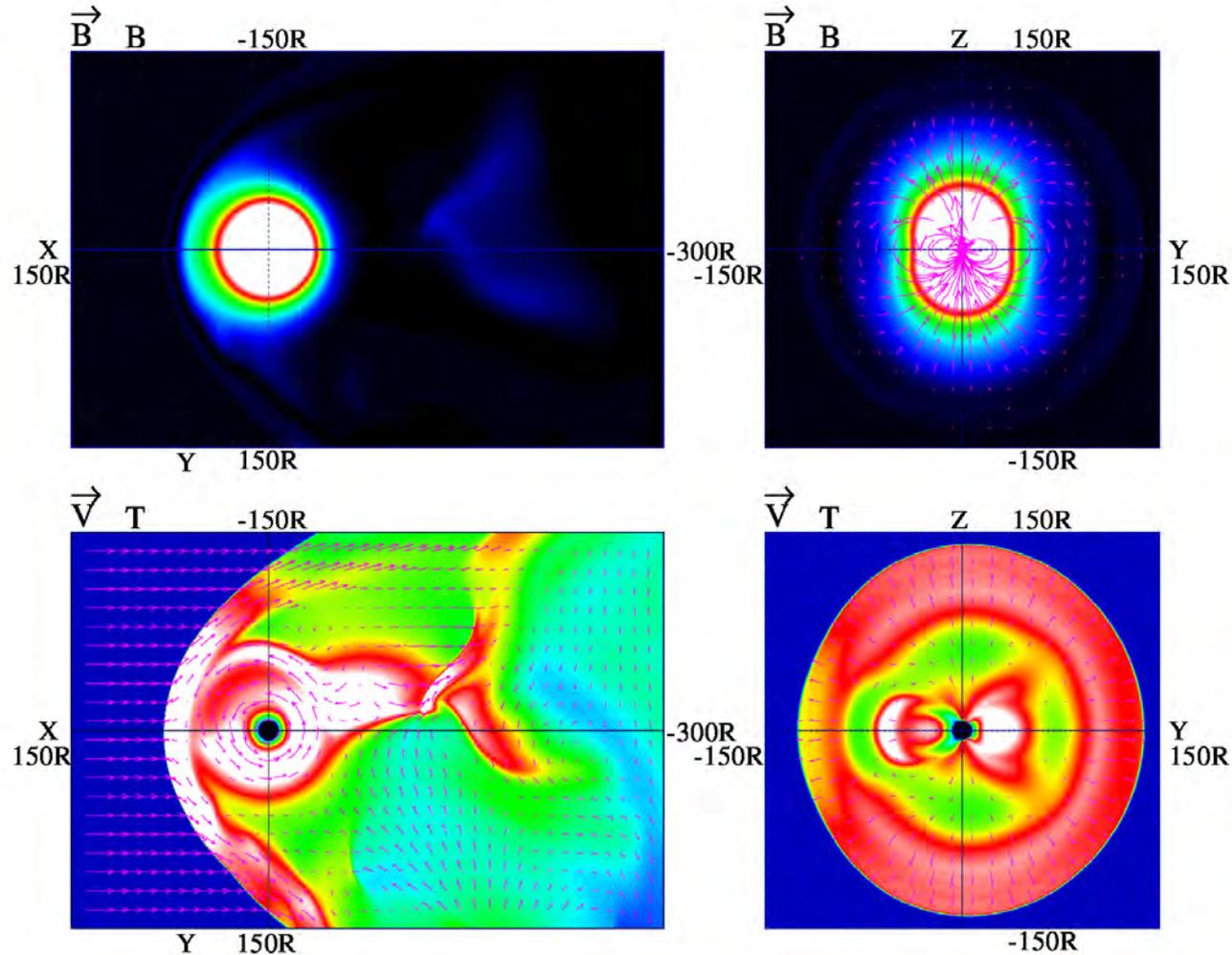
Simulation setting

- Simulation size: **6000×4000×2000=3TB**
- Data output periods: 2.5hr
- Resolution: $0.15R_J$ at maximum (we used $1.5R_J$ in 2005ver)
- Inner boundary: nearby Io torus $5\sim 7R_J$
(we set the inner boundary $15\sim 20R_J$ in 2005ver)

高解像度木星磁気圏MHDシミュレーション

High resolution Jovian Magnetosphere

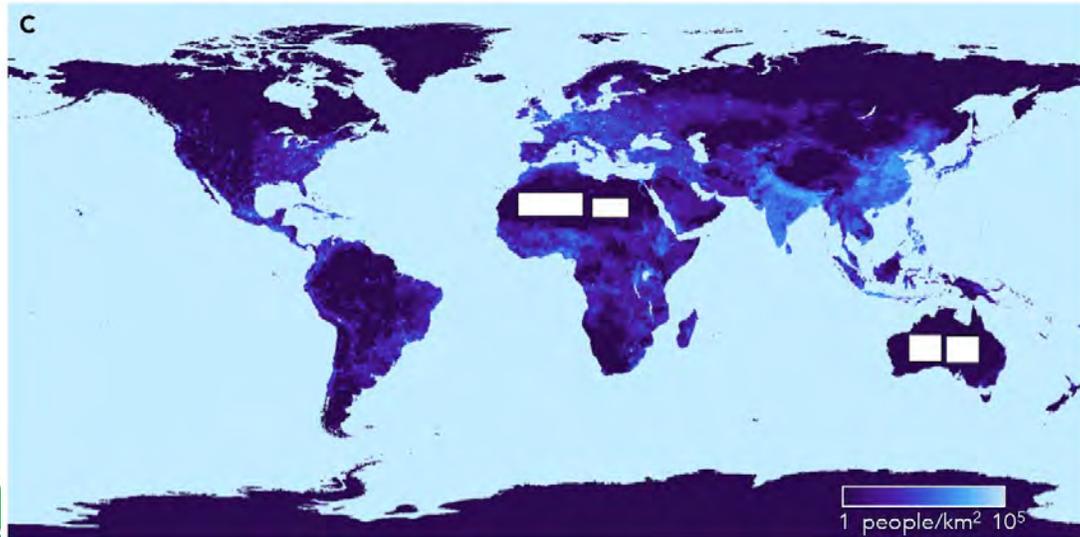
Dyn = 0.01 nPa, IMF = 0.105 nT, t = 127.50 h



MHDコードの性能

	Core/CPU	Rpeak [TFlops]	Rmax [TFlops]	Rmax /CPU [GFlops]	Eff. [%]	B/F	Suitable domain decomposition	CPU architecture
SX-AT	1024/128	314.37	61.47	480.2	20	0.50	2D xyzm	Vector 20B
K	262144/32768	4194.30	914.12	27.9	22	0.50	3D mxyz	SPARC64 VIIIfx
FX100	16384/512	576.72	91.49	178.7	17	0.42	3D xyzm	SPARC64 XIfx
EPYC7282	32/2	1.43	0.20	99.9	14	0.12	3D xyzm	Approx. AVX2
ITO-A	72000/4000	6912.00	470.10	117.5	7	0.07	1D xyzm	Xeon (Skylake)
XC40	1088/16	48.86	4.32	273.3	9	0.16	3D xyzm	Xeon Phi KNL
Camphor3	112/2	6.81	1.84	921.6	27	0.47	2D xyzm	Xeon (SPR) HBM
Laurel3	112/2	7.17	0.85	426.0	12	0.09	2D xyzm	Xeon (SPR) DDR
Tesla K20X	2688/1	1.31	0.15	153.3	12	0.19	3D xyzm	Kepler
ITO-B GPU	3584/1	5.30	0.38	382.2	7	0.14	3D xyzm	Pascal
DGX-A100	27648/8	78.08	8.90	1113.0	11	0.16	3D xyzm	Ampere
ThunderX2	256/8	0.70	4.50	86.9	16	0.30	3D mxyz	Arm v8
FX700	192/4	1.70	11.06	425.5	15	0.37	3D xymz	A64FX

もう少し低い高度の問題

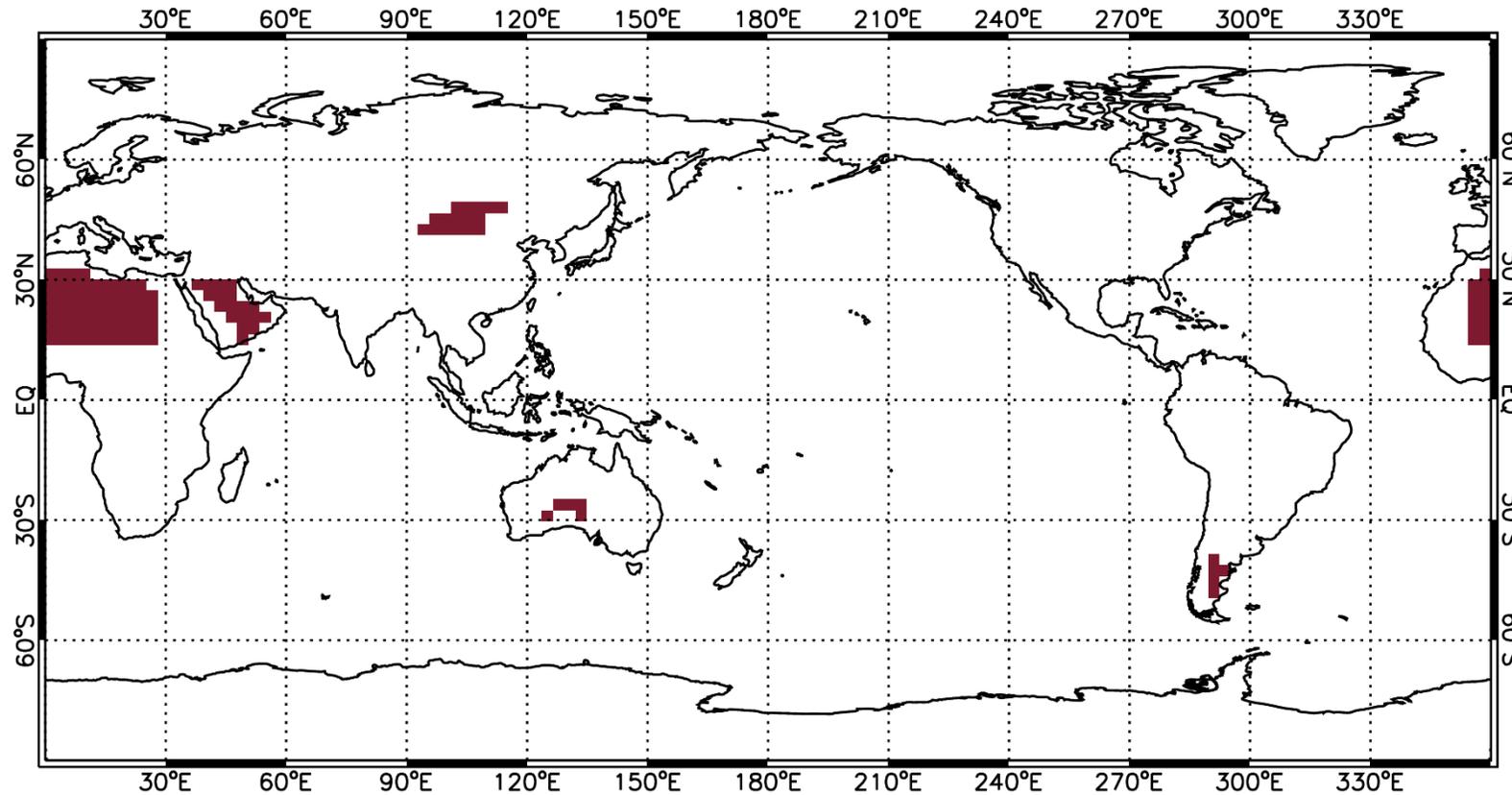


地球温暖化を放射シートで防ぐ

- 地球表面の1~2%に $100\text{W}/\text{m}^2$ のシートを設置すると地球温暖化は止まる(Munday, 2019)。
- 地表 $5 \times 10^{12}\text{m}^2$ に $100\text{W}/\text{m}^2$ シートを設置すると、全球的に $1\text{W}/\text{m}^2$ 放射が減る。
- その大きさが左図B。
- 人口が少ない箇所に上記の領域をまとめると左図Cとなる。

地表に太陽エネルギー放射シートを敷いてみよう

Five Great Deserts (Sahara, Arabian, Gobi, Great Victoria and Patagonia)



全球大気シミュレーション

地球全体を解く数値シミュレーションで実験

Global Climate Model (GCM) simulation [三好モデル@九大] is used.

Model covers the region from the ground surface to the upper thermosphere and has 20 vertical layers in the troposphere.

In the simulation, sea surface temperature is fixed.

Grid size is (128 x 64) in longitude x latitude.

→ To decrease computation time for the parameter survey (FP64必須).

Calculation starts from January 1, 2020 for one year.

Sheet effects are reflected in albedo and blackbody radiation calculations.

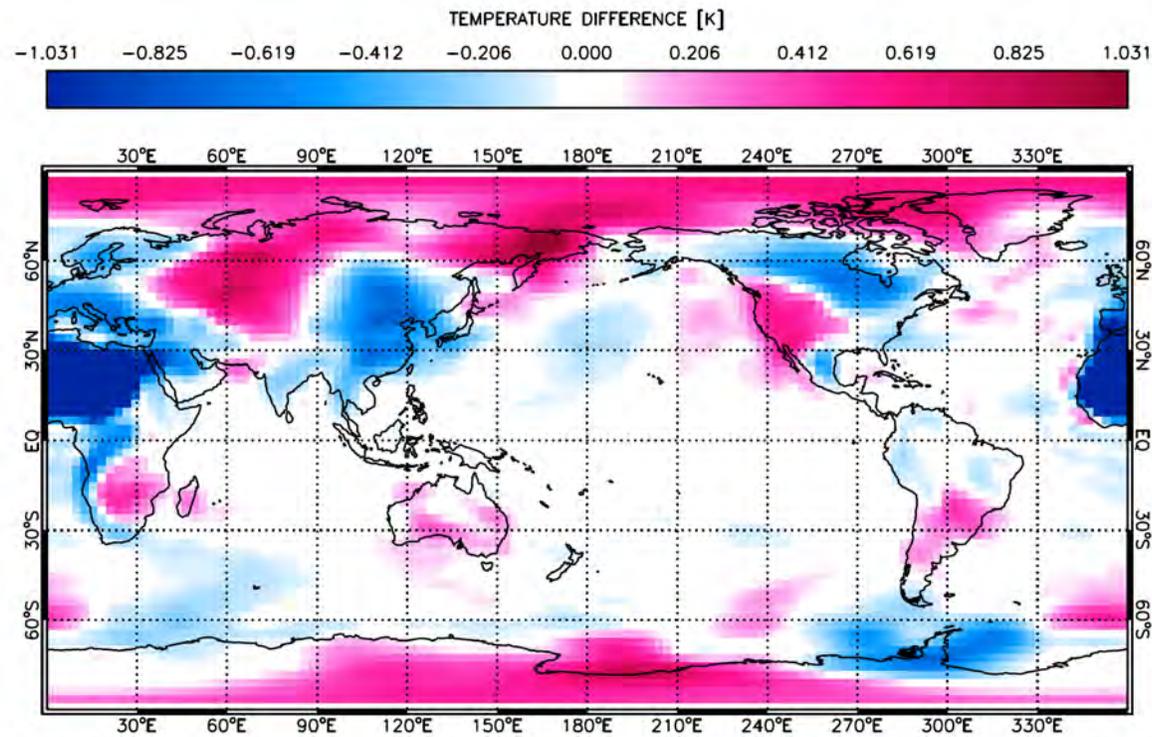
The surface albedo is set to 0.9 (original: 0.3).

Camphor3@KyotoU (Xeon Max + HBM2e)を2ノードで約1週間/シート.

サハラ砂漠にシートを置いた場合

Surface temperature distribution in the Sahara Desert case

annual average of difference with/without sheet

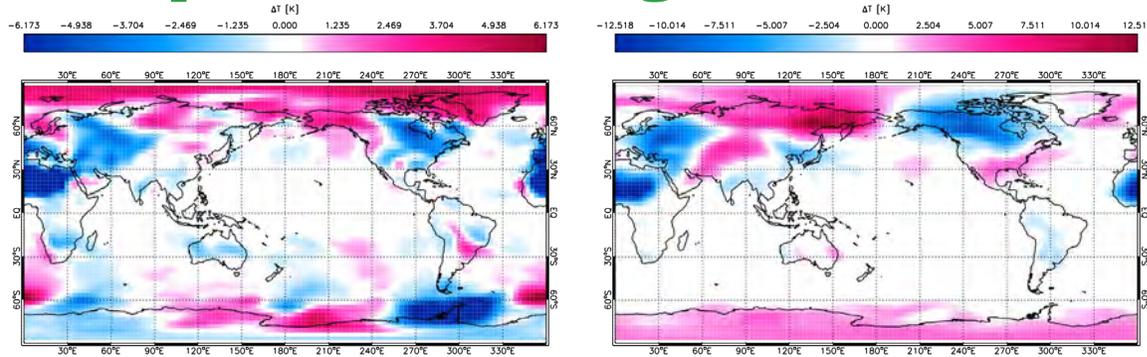


	Global avg.	On sheet
2020.1	-0.140	-0.196
2020.2	-0.198	-0.360
2020.3	0.014	-0.370
2020.4	-0.292	-0.419
2020.5	-0.327	-0.624
2020.6	-0.348	-0.433
2020.7	-0.235	-0.483
2020.8	-0.336	-0.525
2020.9	-0.312	-0.410
2020.10	-0.235	-0.335
2020.11	-0.279	-0.424
2020.12	-0.168	-0.292
Avg.	-0.238	-0.406

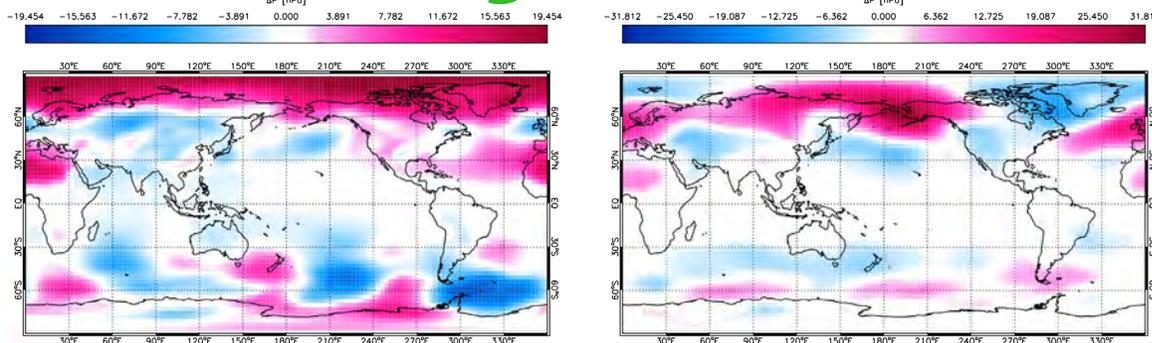
サハラ砂漠にシートを置いた場合

Seasonal effects in the surface temperature and Pressure

Temperature (August, December)



Pressure (August, December)



A vast equatorial desert, the Sahara reflects strong solar radiation, cooling the surface and leading to a significant increase in local pressure.

細かなスケールへの影響も見たい

グローバルな磁気圏構造以外への影響を知りたい

- 物理過程が異なる領域が結合している
- スケールによって取り扱える物理が異なる

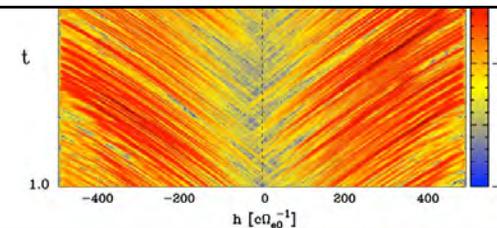
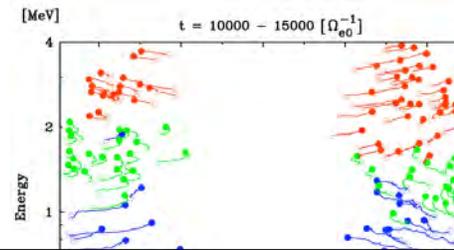
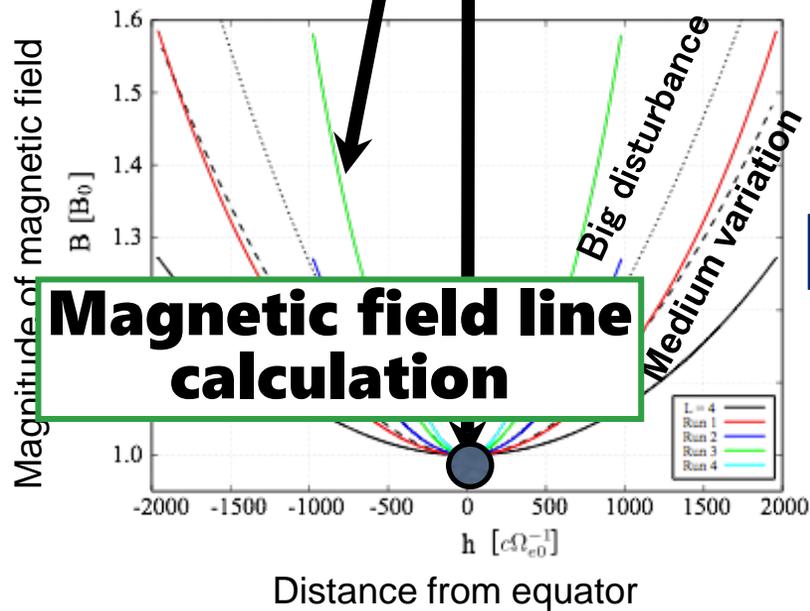
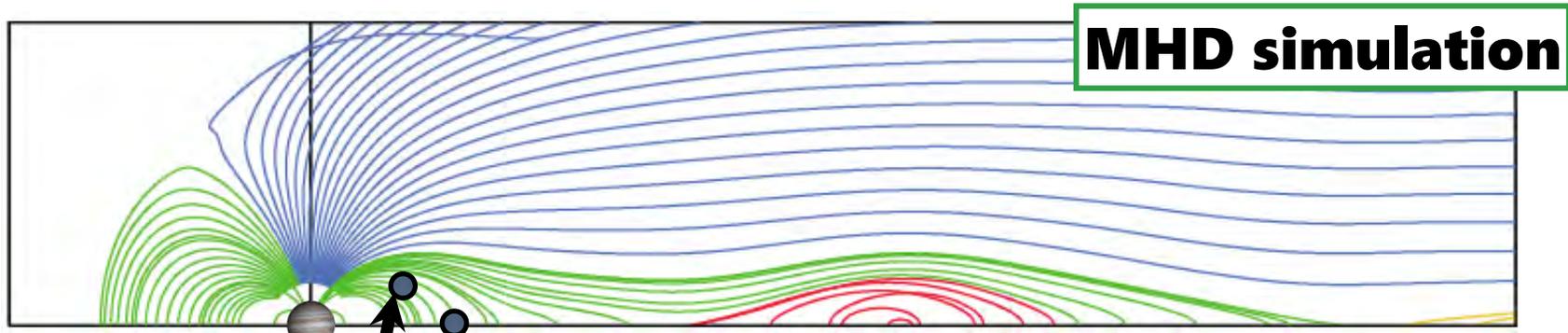
→1つのシミュレーションモデルですべてを取り扱うことは不可能

歴史的に領域毎、スケール毎でシミュレーションが独自発展している

- シミュレーションを結合するにも独自実装が多く困難を伴う
- そのためシミュレーションの結合はほとんど行われてこなかった。

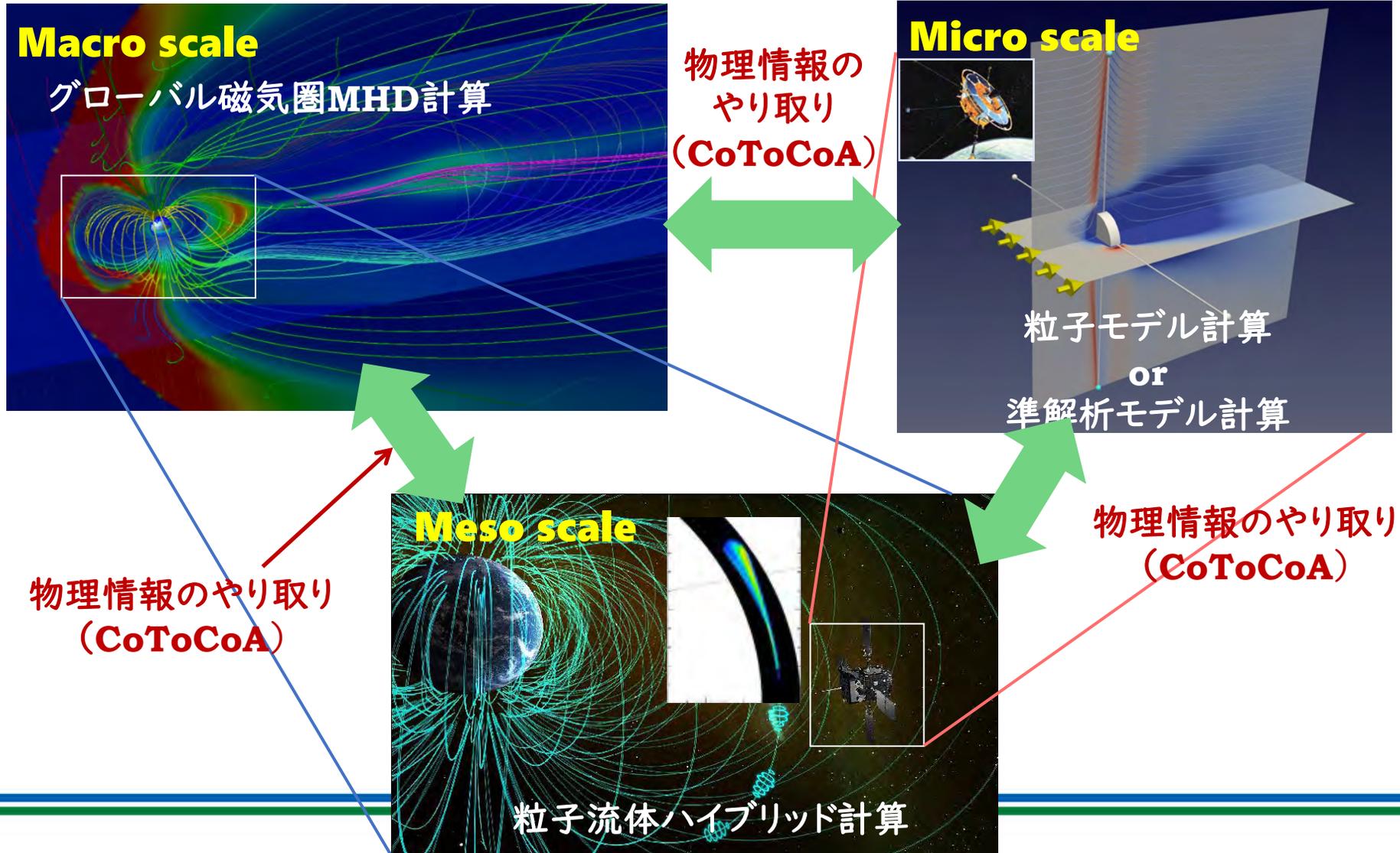
シミュレーションを結合した連成計算が必要

連成計算の例



CoToCoAを用いたモデル間結合例

磁気圏-波動粒子相互作用-人工衛星のスケール間結合



CoToCoA Framework

CoToCoA (Code To Code Adapter)はある(並列計算)コードとあるコードを簡単に結合させるライブラリ

CoToCoAの特徴

- 結合されるコードへの変更は最小限
→ それぞれのコードは別プロセスグループで実行される
- 基本的には他のコードへのデータ転送時に他のコードのランク番号を知る必要が無い
→ 他のコードを理解する必要が無い
- 今はMPIベース
- Cで開発され、Fortranにも対応。(Worker部分は)Python対応。
→ HPC系シミュレーションの計算結果をメモリtoメモリでPythonへ。



<https://github.com/tnanri/cotocoo>

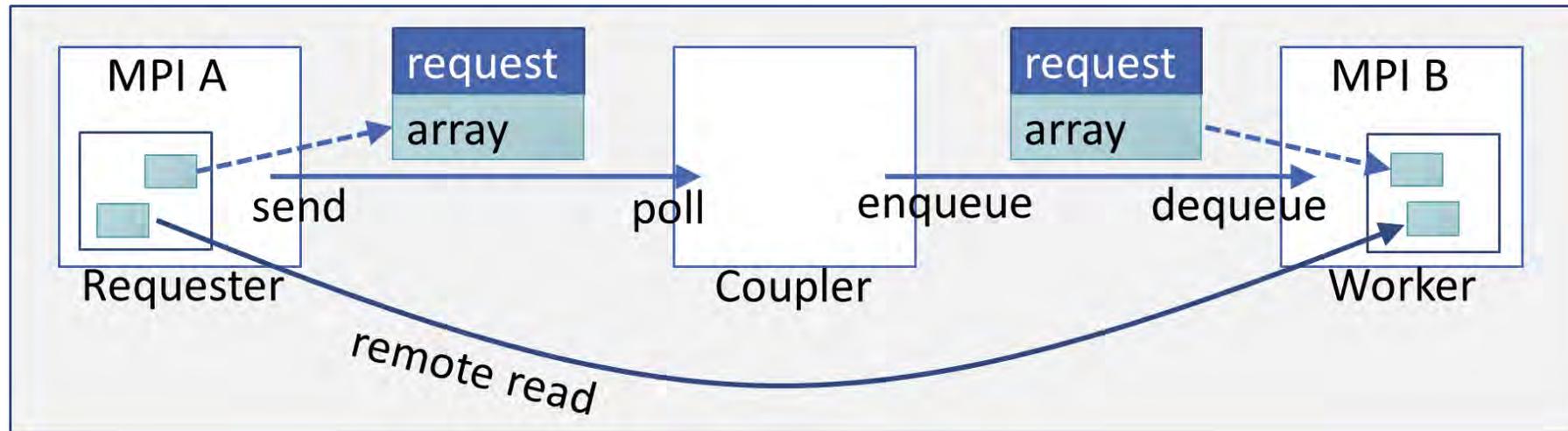
doi:10.5281/zenodo.5655840

CoToCoA Basic Behavior

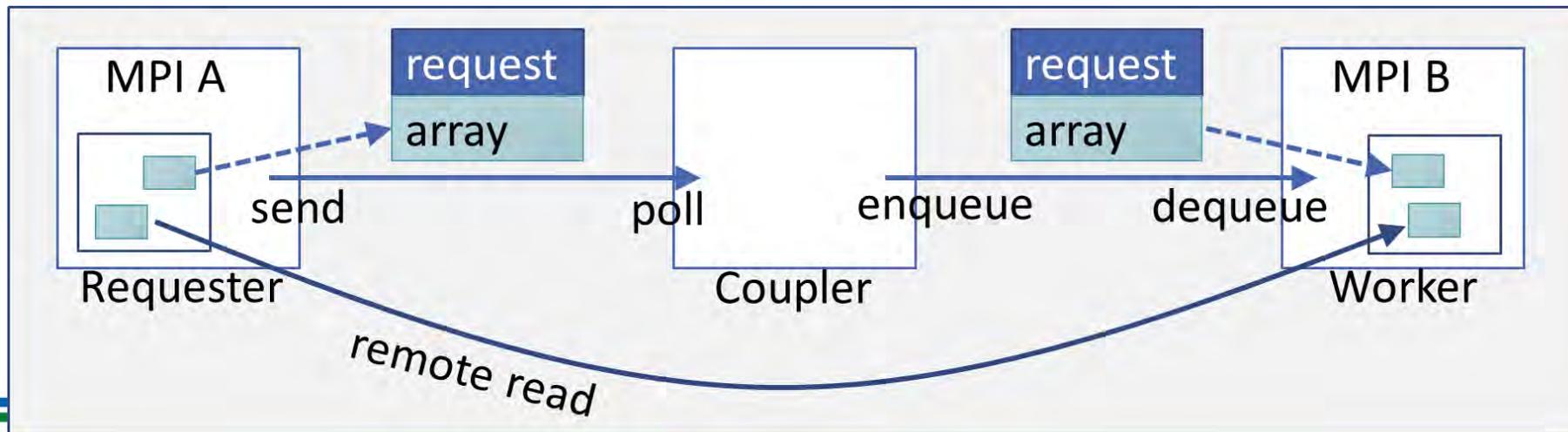
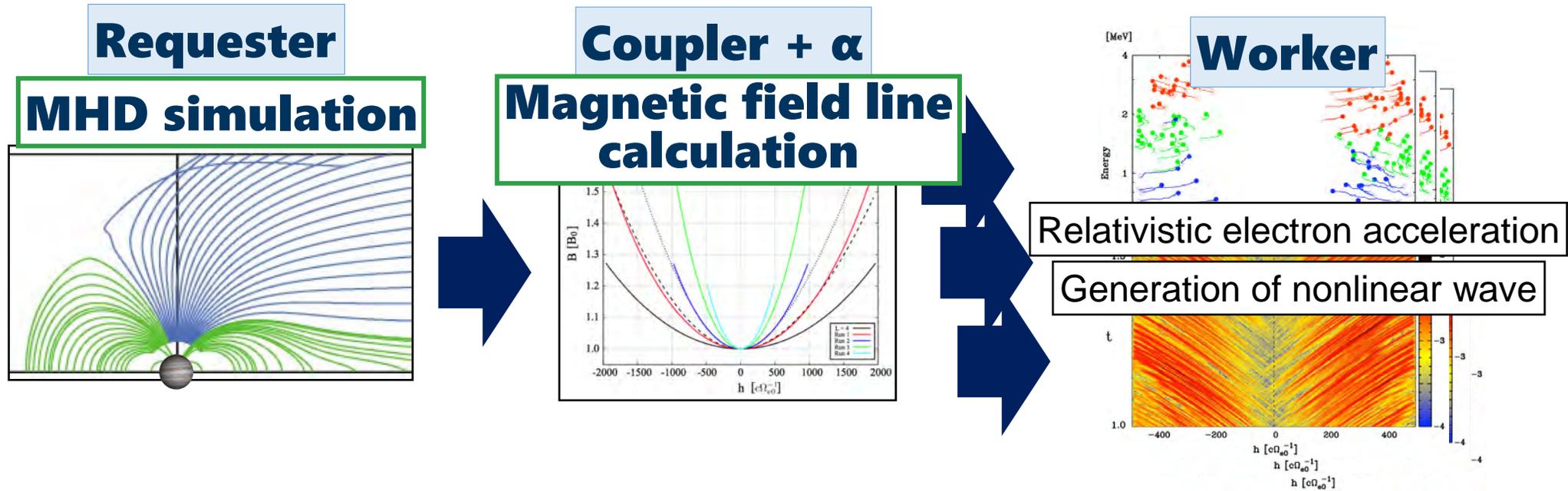
There are three interfaces to connect the codes

- Requester : Send calculation request to Coupler
- Coupler : Receive the request from Requester then transfer the data to selected Worker
- Worker : Run the program according to request from Coupler

Coupler enables easy connect among the codes!!



MHD-EH Simulation



CoToCoAの実装例

Requester

```
call CTCAR_init()
call mpi_comm_rank(CTCA_subcomm, irank, ier)
call mpi_comm_size(CTCA_subcomm, isize, ier)

! Initialization part

call CTCAR_regarea_real4(f, nn3*nb, areaid)

do ii = 1, last
  boundary set
  MHD Calc

  call CTCAR_sendreq(itable(-1,-1,-1),
    & itable_size)
enddo

call CTCAR_finalize()
```

Coupler

```
call CTCAC_init_detail(10, 10, 100, 80000, 10)
call MPI_Comm_size(CTCA_subcomm, nprocs, ier)
call MPI_Comm_rank(CTCA_subcomm, myrank, ier)

call CTCAC_regarea_real4(areaid)

do while (.true.)
  call CTCAC_pollreq(reqinfo, fromrank,
    & itable(-1,-1,-1), itable_size)
  if(CTCAC_isfin()) exit
  call CTCAC_readarea_real4(areaid, rank_xyz, tdisp,
    & size, b(0,0,0,1))

  Calculation of magnetic field line

  call CTCAC_enqreq_withreal8(reqinfo, progid,
    & itable(-1,-1,-1), itable_size, mgl, 6*length)
enddo

CTCAC_finalize();
```

Worker

```
call CTCAW_init(1, 1)
call MPI_Comm_size(CTCA_subcomm, nprocs, ierr)
call MPI_Comm_rank(CTCA_subcomm, myrank, ierr)

call CTCAW_regarea_real4(areaid)

do while (.true.)
  call CTCAW_pollreq_withreal8(fromrank,
    & itable(-1,-1,-1), itable_size, datareal8,
    6*100)

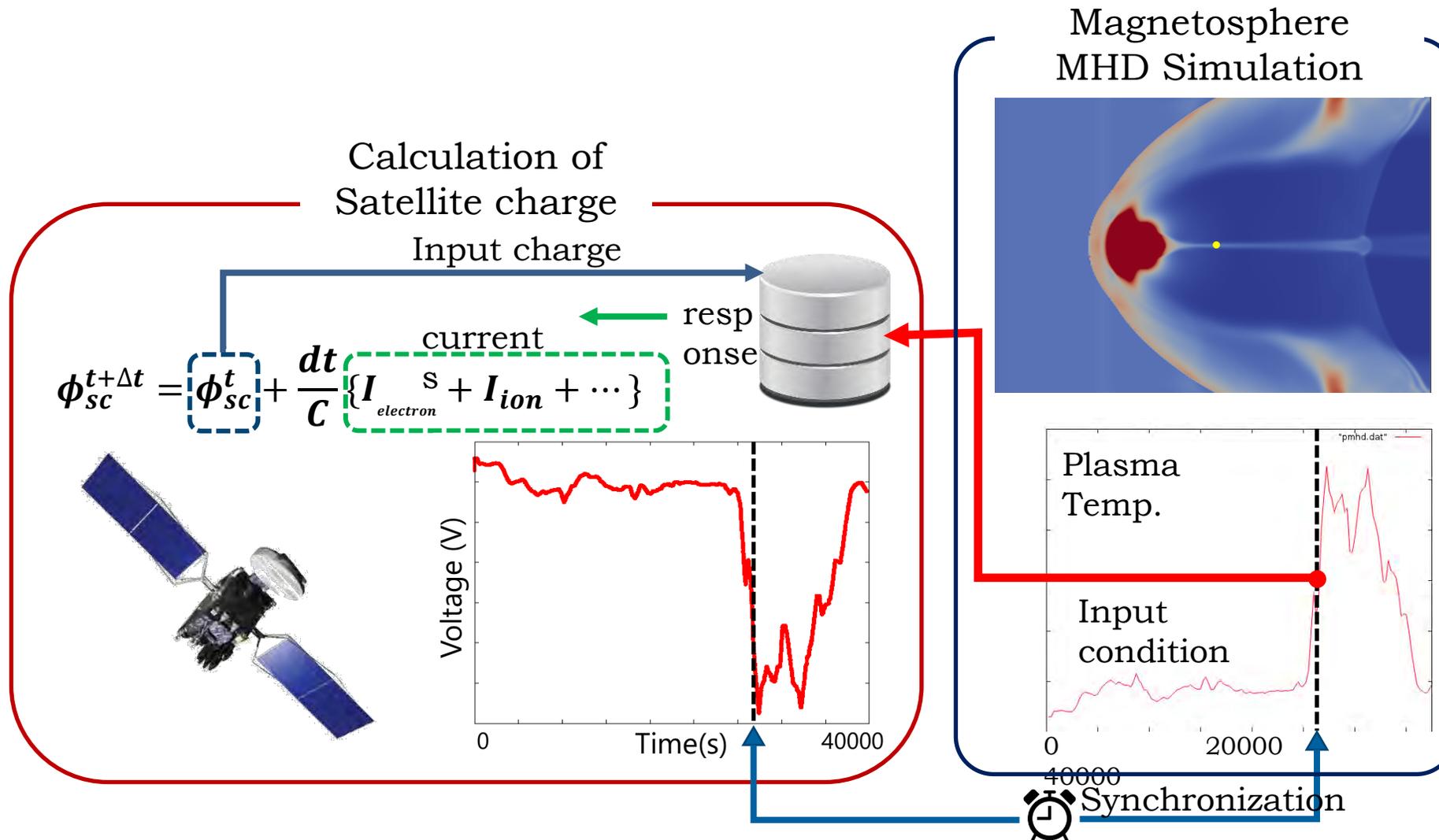
  if (CTCAW_isfin()) exit

  call CTCAW_complete()

  Worker calculation
end do

call CTCAW_finalize()
```

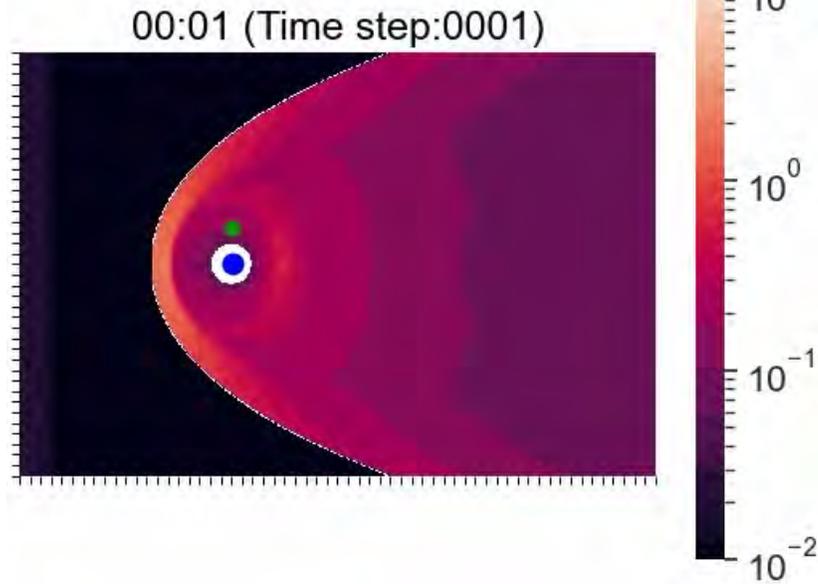
Magnetosphere-Satellite Charge Simulation



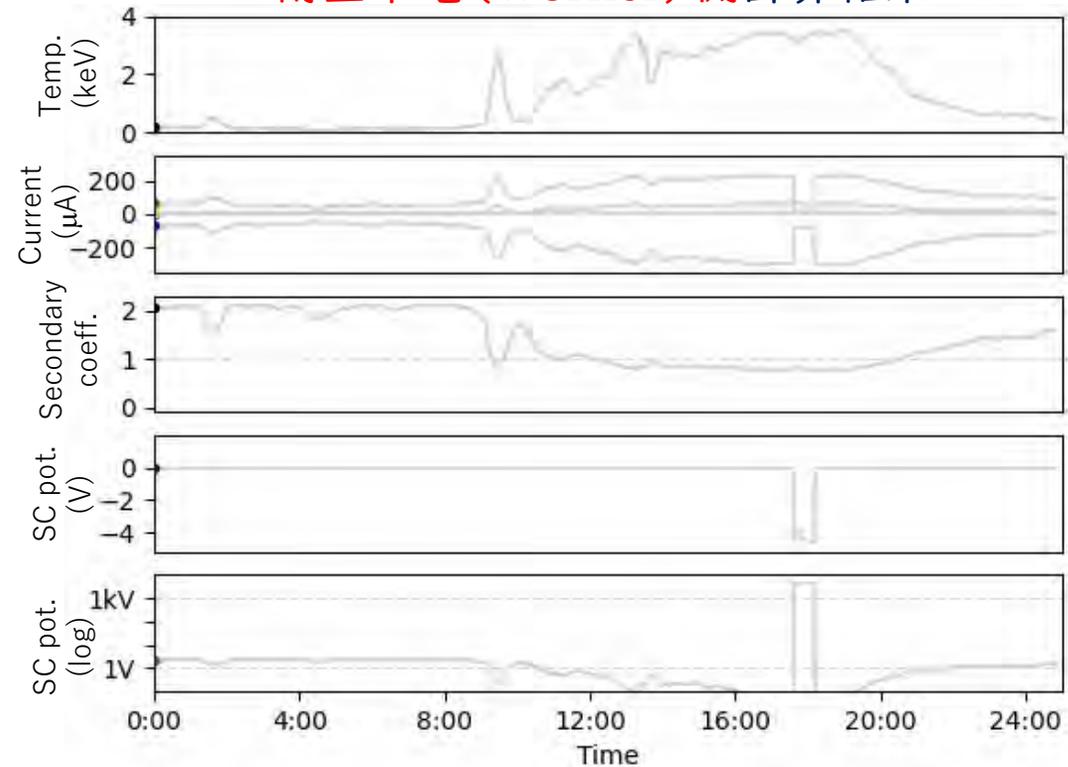
連成計算の動作検証

2010年4月15日に発生した磁気嵐での衛星帯電の数値再現
当時、Galaxy15衛星(米国)が表面帯電の障害を経験した

MHD (Requester) 側計算結果:
プラズマ温度分布



衛星帯電(Worker)側計算結果



各コードに最適なヘテロな環境での動作

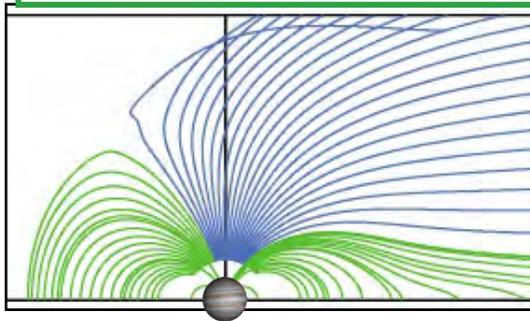
コードに最適な計算機で実行し、連成計算させることも可能
阪大スパコン環境でテスト(ご協力ありがとうございます)

CoToCoA

Vector

Requester

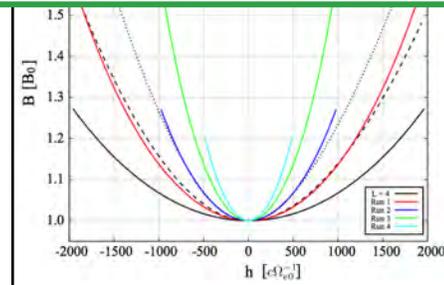
MHD simulation



GPU

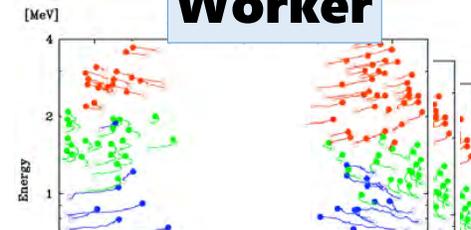
Coupler + α

Magnetic field line calculation



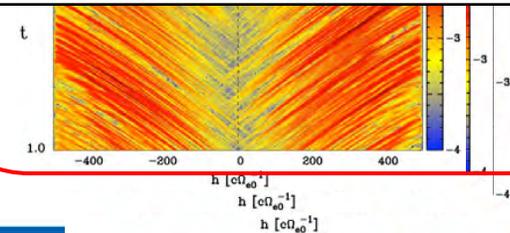
x86

Worker



Relativistic electron acceleration

Generation of nonlinear wave

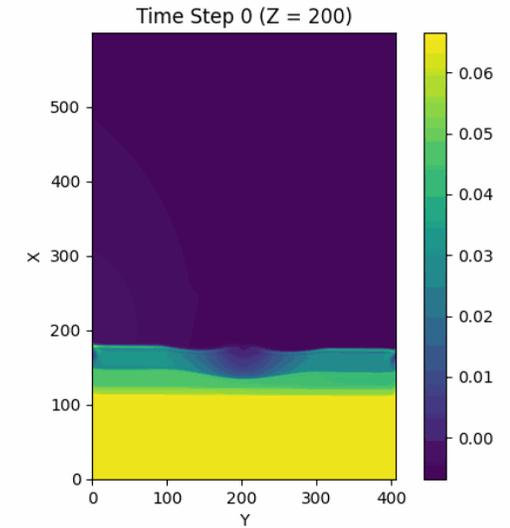
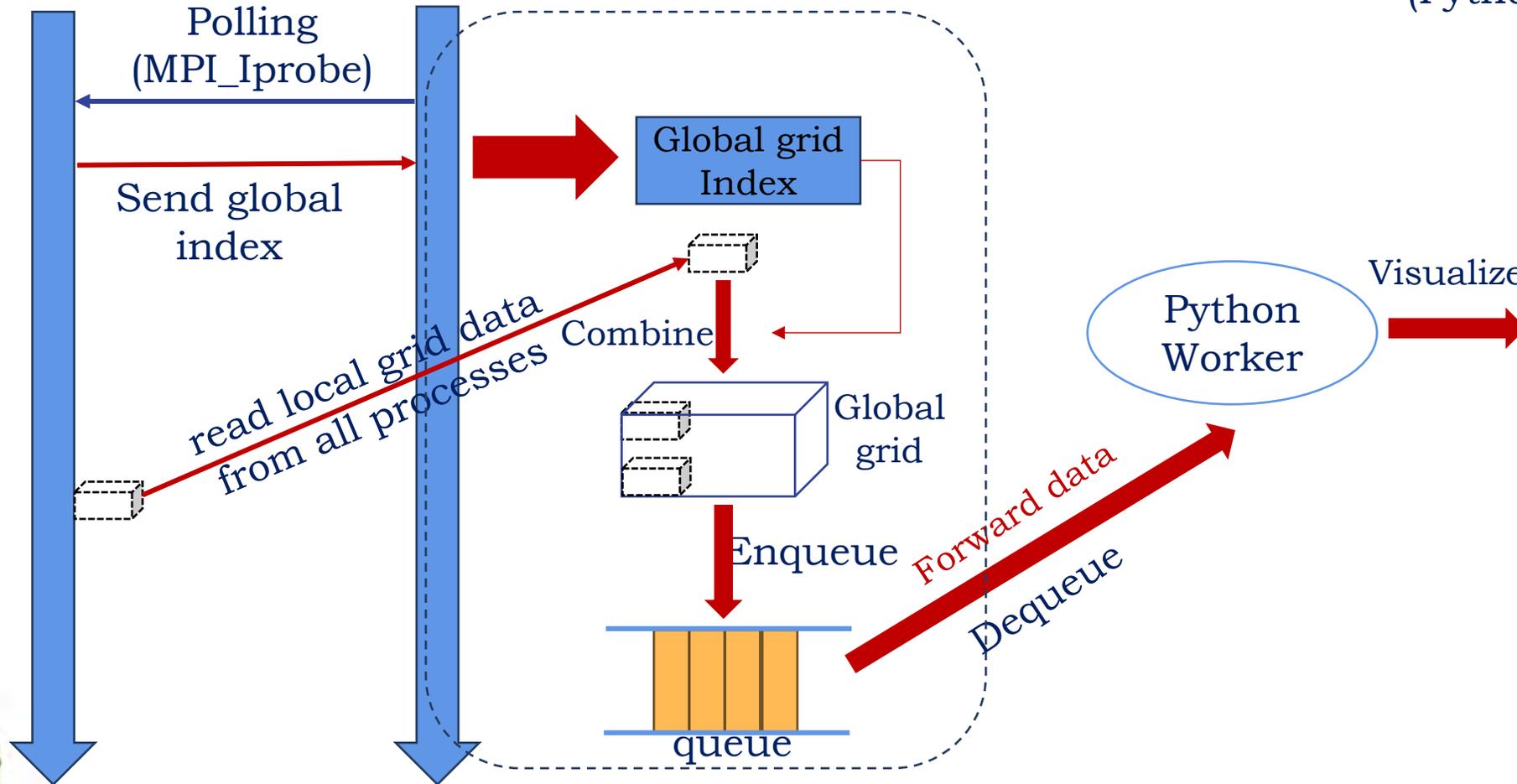


Python利用リアルタイム可視化例

Requester
(MHD simulation)

Coupler

Worker
(Python program)



具体的な結合モデル

大気圏から電離圏を解くGAIAと磁気圏を解くREPPUを結合する

連成するとGCMがそれだけに閉じないため、サロゲートモデルは難しい。

一方で計算結果から予測して更に先の予報を出すような解析がAI活用で想定。

このレベルの連成計算は、単体でスパコンで計算するモデルの結合となり、計算資源がより必要となる。

うまく動作させるためにシステムレベルでの調整もあり、スパコンセンターの運用技術協力が必要と想定される。

可算格点・経度・緯度・高度の構造格点

まとめ

超高層大気分野やそこでのシミュレーション、連成計算に関して 雑多に紹介しました

- ✓ 宇宙天気とその影響
- ✓ MHDシミュレーションによる磁気圏解析
- ✓ 大気シミュレーションによる放射冷却シートの効果解析。
- ✓ 宇宙天気現象がスケールの異なることによる連成計算の導入
- ✓ 連成計算フレームワークCoToCoA
- ✓ 磁気嵐時の衛星故障を、磁気圏シミュレーションと衛星帯電計算で解析
- ✓ 超高層大気分野は、(計算機科学者からあまり見えていない気がしますが) 計算の速さ、大規模ストレージ、早いデータ転送などスパコンとその環境を必要であり、AI4Sも促進しています。
- ✓ これらが実行できるスパコンセンターを期待します。

