## 3D コスミックトモグラフィを用いた衛星観測

代表研究者 蔡東生 筑波大学 システム情報系 准教授

研究目的



図1宇宙トモグラフィー研究概要①②③④⑤⑥ 本研究では,世界で初めて,図1概念図①-⑥に示すように,従来のその場(in-situ,点)の衛星観測を越え た,実用的かつ革新的3Dコスミックトモグラフィー観測学の確立を,最新の数学理論(圧縮センシング/スパ

ースモデル)と深層学習(畳み込みニューラルネットワーク:CNN)を使い目指す.情報科学専門家と宇宙科学者(蔡)が共同で,宇宙トモグラフィーに取り組むことにより従来不可能であった,新時代の宇宙観測法の確立を目指す.医療診断の進歩において,2次元のレントゲン写真からCT,MRI,マンモグラフィー等の3Dトモグラフィーの発展が診断に与えた革命的インパクトは言うまでも無い.現在世界中の病院でCT,MRI,マンモグラフィー等が当然のように使われ,多くの人命を救っている.同様の革命的変化,インパクトが宇宙観測においても巻き起こる可能性がある。本研究では、3次元大域的粒子シミュレーションを用い、地球磁気圏に侵入する太陽風からの高エネルギー粒子と電離層中性粒子との電荷交換により発生する軟X線を利用した、仮想人工衛星による磁気圏の3D断層撮像をシミュレーションし、衛星に必要な3Dトモグラフィーに必要なアルゴリズムを開発する.図1に示すように、①太陽風は磁気圏カスプ領域等に複雑に侵入し、②磁気圏中性粒子と電荷交換反応を起こし、軟X線を放射する.③衛星(CuPID,Smile[*Walsh et al.*,2016]、GEO-X等)に搭載される複眼(海老の目)X線イメージ検出器で②の放出X線イメージを異なる衛星軌道から複数撮像する、これはCT撮像原理と同じで、④複数撮像イメージをフーリエ変換し、投影断面定理[*Bracewel1*,2003]により3Dフーリエ撮像を再構成する.⑤少ない撮像データから最新の数学理論(圧縮センシング/スパースモデリング)を用い、高精度な3Dイメージ再構成理論・技術(宇宙トモグラフィー)を確立する.

## 2 研究内容

#### 2-1 研究背景

## (1)学術的問題

電波天文学において、1956年にBracewellらによって、レーダによる太陽フレアトモグラフィー(断層影像)を実現するための投影断面定理(図1④)が提案された.その後、医療診断(CT, MRI等)に応用され、その貢献の大きさから1972年にノーベル賞を受賞した.しかし、宇宙観測においては利用できる衛星ミッションと搭載計測機器がなかったこと、断層撮像する観測点・解像度不足等の問題により、この手法は宇宙観測分野で忘れ去られてきた.また、X線天文衛星ROSAT、XMM-Newton、「すざく」等の活躍により、地球磁気圏に捕捉された太陽風イオンは、地球の外層大気(ジオコロナ)と電荷交換反応を生じ、軟X線を放射することが分かった.

世界で初めて X 線を用いて,磁気圏境界面(カスプ, シース,低緯度境界層等)における複雑な太陽風の 侵入と外層大気との電荷交換を介在させた干渉現 象を可視化するため,X線イメージ撮像カメラ [Collier et al., 2012]が作成され、CuPID(NASA), SMILE(ESA), Geo-X(JAXA)等の衛星ミッションに搭 載されようとしている.これにより,(1) 磁気圏構 造のグローバルな撮像,(2) 太陽風-磁気圏相互作 用のグローバル撮像を行い,太陽風の地球への複雑 な侵入と、それによる磁気圏の大域的応答変動の様 子が理解できるようになり、より高精度な宇宙気象 予報の確立に寄与できる.しかし,X線レントゲンは あくまで 2 次元画像であり,複雑な3D 現象は明ら かにならず,CT, MRI がもたらした革命的科学イン パクトはない.本研究では,最新の圧縮センシング/ スパースモデリングにより,限られた衛星からの撮 像,解像度から詳細で,最適な3次元断層撮像を可能



図2:宇宙トモグラフィーの原理(投影断面定理)

にする革新的・画期的な衛星による宇宙トモグラフィー法を3次元大域的シミュレーションにより明らかに する.本研究では SMILE 衛星の X線検出装置を中心に研究するが,遠赤外線,ENA検出器,レーダ,ガンマ線検 出器でも同じ手法が利用でき,応用性は非常に高い.

本研究の着想の原点は、2015 年に X 線カメラ搭載衛星 Smile の開発グループの<u>ボストン大学 Brian Walsh</u> 教授,欧州宇宙共同体 Escoube 博士からの Smile 衛星における X 線放射現象のシミュレーションの依頼であ る. CuPID, Smile 衛星で使われている下式(4)の電荷交換部は <u>Vasilinius らの近似経験則[Cravens, 2000]で</u> <u>あり、理論計算はされていない</u>. X 線カメラで受像するイメージはレイトレーシングで、受像する X 線跡(レイ) に逆に沿って、ピクセルごとに以下のように X 線強度を線積分する.

$$F_{Line} = \int_0^\infty n_n n_{sw} \, v_{rel} \langle \sigma \rangle f b \frac{d\Omega}{4\pi} dl, \quad v_{rel} = (v_{sw}^2 + v_{therm}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

ここで, *n<sub>n</sub>*, *n<sub>sw</sub>*, *v<sub>rel</sub>*, *σ*, f, b, *v<sub>sw</sub>*, *v<sub>therm</sub>*はそれぞれ, 中性粒子密度, 太陽風密度, 相対速度, 散乱角, 中性粒子密度に対するレイ方向に発生するイオン密度の比, レイ方向に発生するフォトンの干渉の割合, 太陽風, 熱運動速度である. 式(4)は経験式で, 実験室系では近似的に合っているが, 実際の宇宙空間で有効か不明で, グローバル粒子シミュレーションで, 太陽風イオンと中性粒子を実際にモンテカルロ的, 即ち, 確率的に衝突させ, X線を放射させる必要がある.

#### (2)研究で明らかにしようとしている点

1,3次元大域的シミュレーションを用いた仮想 SMILE 衛星の X線撮像と投影断面定理による CT 断層画像の再構成

本研究では、まず3次元グローバル粒子コードを用い、モンテカルロ法により、地球磁気圏に侵入する高エ ネルギー粒子と中性粒子の電荷交換により、仮想的に X 線を放射する.SMILE 衛星の軌道を模した、仮想衛星 をシミュレーション中に投入し、X 線のレントゲン撮像を仮想的に行う.シミュレーションを進めながら、異 なる時刻の軌道から複数のX線撮像を作成する.図2のように,仮想衛星による複数のX線撮像をフーリエ変換し,投影断面定理により,3Dトモグラフィー(図2右)を再構成する.最後に,逆フーリエ変換により,実際の3D断層を再構成し,その物理的意味を検討する.

2,仮想衛星X線カメラデータに対する圧縮センシング/スパースコードデザイン

1の手法では解像度が十分ではなく,仮想衛星データに対し最適な3D 断層再構成のため,図3のように, 圧縮センシング/スパースモデリング ( $y = \Phi \Psi \alpha$ )を行う.衛星で観測される複数の撮像yをここでは簡単のた め次数 M の一次元ベクトルで表示し, $M \times N$ の圧縮センシング行列 $\Phi$ , $N \times N$ の辞書行列 $\Psi$ ,スパース表現ベク トル $\alpha$ ( $\alpha$ は最適な再構成3D 撮像)とする.Nは実際の撮像の物理的次数で,観測撮像の次数は M で,MNで,図 3は非決定論システムで,これだけでは解けない. $\Phi$ は衛星撮像サンプリング (センシング) 行列を表現し, $\Psi$ は辞書行列で,信号をスパース表現に変換する基底変換.例えば、ウエーブレット変換,離散 cosine 変換(DCT) 等が $\Psi$ に相当する.再構成撮像 $\alpha$ がスパース化されることは、最適に高解像度に3D 撮像が再構成されたこと を意味する (重要).ここで、まず、 $x = \Psi \alpha$ とすると、観測撮像 $y = \Phi \Psi \alpha = \Phi x$ となる.xはN次ベクトルで,MN で、この式は非決論定的である.まず、撮像を再構成する最適標本化(センシング) を行うため、下記の条件付 最適化式を解く

$$\min_{x \in \mathbb{R}^N} \|x\|_0 \quad \text{subject to} \quad y = \Phi x \tag{1}$$

ここで、 $\|x\|_0$ はベクトルxの $l_0$ ノルムで、非ゼロ要素の数で、Sparsity と定義.即ち、 $y = \Phi \Psi \alpha = \Phi x$ のスパースモデル化を行う.これは basis pursuit と呼ばれるアルゴリズムで求まり、一般的解としてインコーヒーレントサンプリングとなる[*Candes*, 2006].次に、3D 撮像再構成のため例えば、以下の最適化式を解く

$$\min_{x \in \mathbb{R}^N} \|\Phi x\|_{l_p} \quad \text{subject to } \|y - \Phi x\|^2 < \epsilon$$
(2)

 $l_p$ は p 次のノルムであり, 最適化に関しては, 式(2) 左の項以外に $\phi_x$ の勾配, エネルギーなど物理モデルに即 した, 評価関数が必要であり, 衛星搭載 X 線カメラの撮  $\mathfrak{A}_{\mathfrak{A}} \mathfrak{p}_{\mathfrak{A}} \mathfrak{p}_{\mathfrak{A}} \mathfrak{p}_{\mathfrak{A}}$ 像に関しての評価関数の最適な物理ベースのデザイン が必要である. また, 式(2)の解析解は存在せず, 共役勾 配法, Total Variational 法等の逐次解法が提案されて いるが, いずれも問題があり, 本研究では, 最適化の理論 的研究を行ったが, 実装には至っていない.

3,物理的なスパースコーディングデザイン

3 次元大域的粒子シミュレーションを使い, 仮想的な SMILE, CuPID, GEO-X 衛星で想定される, X 線検出装置の



精度, 想定軌道からの撮像において, 上述の2の圧縮センシング/スパースコードデザインを使い, 最低限の撮 像数(10撮像程度)で物理的に意味のある3次元トモグラフィー再構築を目指す. スパースモデリング理論 のモデル行列の再構成において, 電荷交換ランダム過程を物理的に解明して, 宇宙物理用の Basis Pursuitを 開発し, 精度保証のある, 3Dトモグラフィー理論を構築する. 電荷交換過程はインコヒーレント過程であり, 式(1)でどのようなインコヒーレントセンシングを行うか, 検討した. まず, ヒルベルト-ファン変換を用い, スパースコード化し, ランダムアンプリングにおける精度を検討した.

#### 2-33次元大域的シミュレーションの計算手法

本研究では並列大域的三次元完全電磁シミュレーションコードを用いる。計算領域,IMF 磁場の時間変化 を図4にしめす。太陽方向の境界から、IMF 磁場をもった太陽風を流し、GSM 座標中心にダイポール磁場をお き、地球の磁気圏を形成する。電磁場境界条件は、Lindman の吸収境界条件の一次近似を用いる。この場合、 45度以上で入射する電磁波は吸収され、45度以下の電磁波は反射される。粒子に関しては、境界を離れ る粒子は、一旦取り出され、再度、境界領域に Knudsen 流として注入される。本シミュレーションでは、粒 子の運動論的な振る舞いはモデル化せず,電子とイオンの2流体モデルとしてシミュレーションを行う.ま た、図3のようにモンテカルロ PIC 衝突により地球の電離層をモデル化する。2-1 節の太陽風エネルギー粒 子の電荷交換プロセスもモンテカルト法を持ちいる.



図4:シミュレーションのコンフィギュレーションと IMF の時間変化

### 2-4 磁気圏の作成

水星の磁気圏にはいくつかの特徴があり、大きさに関連して は、magnetopauseまでの距離が小さい、ion inertia ratioが 大きいという特徴があり、これらを踏まえて、磁気圏を作成す る。

·R<sub>MP</sub> =1.3-2.1 R<sub>M</sub>

 $\cdot R_{\text{M}}\text{=}60\text{-}91$  ion inertia length

0



 $R_{\mbox{\scriptsize MP}}\mbox{:} {\rm Distance form GSM center to magnetopause} \quad R_{\mbox{\scriptsize M}}\mbox{:} {\rm Earth radii}$ 

本シミュレーションでは、Alfven Mach Number=4. 6 でシミュレーションを行った。 2-5 研究成果

#### (1) PIC Small Mercury Magnetosphere での Dipolarization 解析

磁気圏パラメターにあわせて、565X375X375のグリッドサイズで小さな磁気圏を作成した。半径 50 グリッドサイズのものを作成した。太陽磁場は(1)北向から、(2)Dusk-Dawn、(3)南向き(Phase 1, Phase 2)に変化する。図4にシミュレーションのコンフィギュレーション、IMFの時間変化を示す。本シミュレーションでは、ダイポール磁場をゆっくり発生させ、太陽風を左からいれて、磁気圏を生成する。次に、図6の(A)-(D)に示すように、IMF 北向きの太陽風をいれ、(A) IMF 北向きの太陽風がシミュレーションボックス全体を満たしたところで、北から Dusk-Dawn に変化させる。再び、(B)新しい磁場がシミュレーションボックスを満たしたところで、再度 IMF を南に変化させ、シミュレーションを一定期間走らせる。IMF 南向きに移ったとき、磁尾部に IMF の浸透が遅れる。そのため、(C) 磁尾部に IMF が浸透しない Phase 1 と浸透する (D) Phase 2 に分ける。



Fig4 (A)IMF North (B) IMF Dawn-Dusk (C)IMF South Phase 1 (D)IMF South Phase 2  $\,$ 

図 6:小さな水星磁気圏. IMF は北向きから Dusk-Dawn、南向きへ順に変化



図7: IMF 北・Dawn Dusk における磁尾部の Bz 変化



図8:IMF 北→Dawn Dusk→南(フェーズ1,2)での、Dipolarization Frontの移動



図9:IMF 北→Dawn Dusk→南(フェーズ1,2)での、イオンフラックスの変化



図 10: IMF 北→Dawn Dusk→南 (フェーズ 1, 2) での、磁場 B の変化



図 11: IMF 北→Dawn Dusk→南 (フェーズ 1, 2) での、3 次元的磁場 B の変化

(2) 高エネルギー粒子侵入プロセスにおける磁尾部の Dipolarization 過程の解析

磁気圏シミュレーションのため,現在我々の使っている、大域的完全電磁粒子コードの物理的妥当性を検 査、立証するため、IMF 北、夕朝、南向きにおけ dipolarization プロセスを解析した。

図7に磁尾部の Dipolarization を示す。図では、磁尾部の Bz 成分を表示している。Bz 成分の変曲点が Dipolarization 点であり、Dipolarization 点が Phase 2 で地球近傍に近寄り、変曲前後の勾配変化を急激に 強くし、Dipolarization を起こしているのが判別できる。図6に、IMF 北→Dawn Dusk→南(フェーズ1, 2) での、Dipolarization Frontの移動を示す。Dipolarization Frontが地球から 15Re までに移動しているこ とが分かる。

図 8-11 において磁尾部におけるイオンフラック、磁場の変化をしめす。これらの図から、Phase 1 で Jyi が最大になり、Dipolarization を進める。Phase 2 Jyi は定常的になり、Diplarization は、地球の磁気圧 力と Jiy によって生成される磁場と釣り合い、安定する。図 8,9 は 3 次元的 Dipolarization の構造をしめ す。さらなる解析が必要である。



図 12: Dipolarization の生成メカニズムと Dipolarization 点の決定メカニズム

## (3) 仮想衛星と電荷交換軟 x 線を使ったコズミックトモグラフィー実験

(1) - (2) で解析を行い、磁気圏への高エネルギー粒子侵入プロセスとその複雑な現象の一部を明らかに した. この3次元大域的粒子シミュレーション中に仮想的に SMILE 衛星を想定した衛星軌道において、コズ ミックトモグラフィー撮像実験を図 13-15 のように行った.図 13 は地球北極部のカスプ部のXY断面のイオン密度である.図 14 は SMILE 衛星を想定した,軌道(図 1,2)におけるラドン変換図である.図 15 は毎5 度のライン検出で得られる撮像である.一部改造度はおちるが,磁気圏カスプ部の特徴を捉えている.



図 13: 仮想衛星が横切る本実験対象の地球北カスプ部位のイオン密度



図14:図13の仮想衛星撮像軌道からのラドン変換分布



図 15:図 13, 14 における,本アルゴリズムを用いたコズミックトモグラフィー撮像 3, 結論

本研究では、仮想的に衛星撮像するため、3次元大域的シミュレーションを行い、その正当性を検証する ために、IMF 北、夕朝、南向きの Dipolarization 解析をおこなった。その結果、図 12 に示すように、磁気 圧力と運動論的圧力のバランスが Dipolarization 線を決定し、このバランスの変化が Dipolarization を引 き起こしている。この、Dipolarization 力学のバランス不均衡は current thinning を引き起こし、ring current を強めることになると考えられる.さらに、本シミュレーションにおいて、SMILE 衛星の軌道とライ ンスキャン、撮像タイミングをシミュレーションし、高エネルギー粒子と中性子電荷交換軟X線によるコズ ミックトモグラフィーシミュレーションをおこなった。毎5度でスキャンラインを行ったが、撮像は一部磁 気圏カスプ部の特徴は捉えているが、解像度が十分とは言えない、衛星計測機器の精度には限界があるため、 画像復元アルゴリズム、スキャンラインのタイミングを最適化しさらに高精度の撮像が必要になる.

# 【参考文献】

Bracewell, R. (2003), The projection-slice theorem, in *Fourier Analysis and Imaging*, edited, pp. 493-504, Springer.

Candès, E. J. (2006), Compressive sampling, paper presented at Proceedings of the international congress of mathematicians, Madrid, Spain.

Collier, M. R., F. S. Porter, D. G. Sibeck, J. A. Carter, M. P. Chiao, D. Chornay, T. Cravens, M. Galeazzi, J. W. Keller, and D. Koutroumpa (2012), Prototyping a global soft X - ray imaging instrument for heliophysics, planetary science, and astrophysics science, *Astronomische Nachrichten*, *333*(4), 378-382.

Cravens, T. E. (2000), Heliospheric X-ray emission associated with charge transfer of the solar wind with interstellar neutrals, *The Astrophysical Journal Letters*, *532*(2), L153.

Walsh, B., M. Collier, K. Kuntz, F. Porter, D. Sibeck, S. Snowden, J. Carter, Y. Collado - Vega, H. Connor, and T. Cravens (2016), Wide field - of - view soft X - ray imaging for solar wind - magnetosphere interactions, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *121*(4), 3353-3361.

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Identifying 3D vortex structures at/around the magnetopause using a tetrahedral satellite con_guration	J. Geophy. Res. (Space Science)	2018
The Beauty of Breaking Rhythms: Affective Robot Motion Design Using JoHa-Kyu of Bunraku Puppet	SIGGRAPH 2019, Los Angeles, Studio Talks, Proceedings	2019
3D Full Particle Simulations of the Solar Wind-Terrestrial Magnetosphere Interaction	13th International School/Symposium for Space Simulations (ISSS-13), UCLA, Los Angeles, UCLA, 2018 (1p). (Solicited and Invited).	2018

〈発表資料〉