

アルマ望遠鏡イメージング ツールPRIISMの 今後の展望



池田



塚越



竹内

池田 思朗¹・塚越 崇²・竹内 努³

〈¹ 統計数理研究所 〒190-8562 東京都立川市緑町 10-3〉

〈² 足利大学工学部 〒326-8558 栃木県足利市大前町 268-1〉

〈³ 名古屋大学理学研究科 〒464-8602 名古屋市千種区不老町〉

e-mail: ¹shiro@ism.ac.jp, ²takashi.tsukagoshi.astro@gmail.com, ³tsutomu.takeuchi.ttt@gmail.com

我々はアルマ望遠鏡のイメージングに向けてPRIISMというツールを作り、公開している。PRIISMは発展途中のツールである。電波干渉計イメージングとして基本的な機能を充実させ、高速化を実現し、CLEANでは実装されていない機能の実現も目指し、今後も開発を継続していく予定である。本稿ではこうした今後の展望を述べる。

1. はじめに

本特集の技術記事に述べた通り、我々はアルマ望遠鏡のイメージングに向けて、PRIISMを開発、公開した[1, 2]。アルマ望遠鏡のデータはビジビリティの点数が多くS/N比もよいため、技術記事に示したようにシンプルな最適化問題を解くことでよい画像が得られる。我々は、天文学への貢献を目指し、より使いやすいツールとなるように小さなチームで開発を続けている。本稿では、開発の状況、今後の開発の課題について説明する。

以下、2章では、現在取り組んでいるビジビリティの校正について述べる。3章ではPRIISMの高速化のために取り組むべき課題について、そして4章ではPRIISMを用いて周波数方向にイメージングを拡張する新しい試みについて述べ、5章で本稿のまとめを述べる。

2. ビジビリティの校正

天体からの電波強度と受信強度は本来比例関係にあるが、比例係数は大気やシステムの変動で時々刻々と変化する。光路長も同様に変化する。イメージングでよい画像を得るには、これらの校正が重要である。そこで電波干渉計のイメージングでは、時々刻々と変化する望遠鏡の“ゲイン”を推定し、ビジビリティを校正している。具体的には、時刻 t の望遠鏡 α と β の相関から計算されるビジビリティ v_k を各望遠鏡の時刻 t でのゲイン $g_{\alpha t}$ と $g_{\beta t}$ とで $v_k g_{\alpha t} g_{\beta t}^*$ のように校正する。電波干渉計ではゲインは複素数であり、*は複素共役を表す。大きさは強度の比例係数を、位相は光路長を校正する。理想的には $g_{\alpha t}=1$ である。ビジビリティを $\mathbf{v}=(v_1, \dots, v_M)^T \in \mathbb{C}^M$ (T は転置)、画像を $\mathbf{x}=(x_{11}, \dots, x_{N_x N_y})^T$ とおく。ゲインを含めてビジビリティと画像とのフィットを書くと、次のようになる。

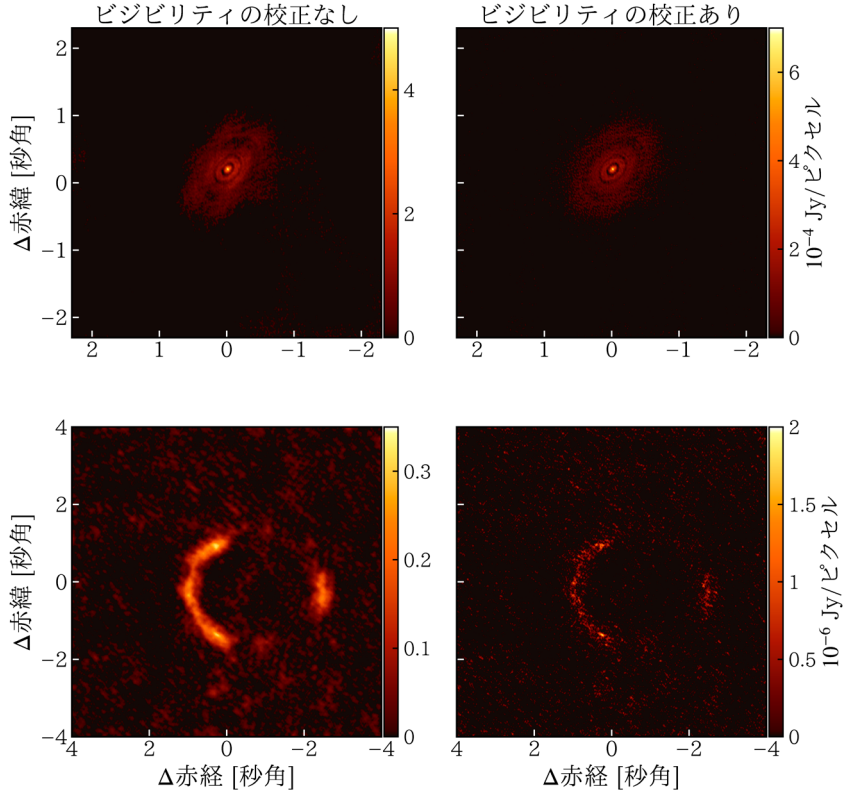


図1 ビジビリティの校正とイメージングの結果 [3]. 左側はビジビリティを校正せず、右側は校正を行い、それぞれ PRIISM でイメージングした結果. 上段は HLTau, 下段は SDP81 の画像. どちらも ALMA SV data [5] を用いた.

$$L_v(\mathbf{x}, g) = \sum_{k=1}^M \frac{|v_k g_{at} g_{\beta t}^* - \mathcal{F}_k(\mathbf{x})|^2}{\sigma_k^2}. \quad (1)$$

電波干渉計で用いられるセルフキャリブレーションの考え方では、画像 $\mathbf{x}$ を固定し、(1) 式を小さくするようにゲインを推定する。(1) 式はゲインに関して非凸で局所最適解が多く存在するため、セルフキャリブレーションにはさまざまな工夫が施されている。

我々はこれを PRIISM と同様に最適化問題として定式化した。その際、ゲインの大きさが平均 1 で、時間的に滑らかに変動するという制約のもとで推定する [3]。すなわち、

$$\begin{aligned} & \min_g [L_v(\mathbf{x}, g) + S_{\mu_1, \mu_2}(g)] \\ & \text{subject to } \frac{\sum_l |g_{al}|}{N_a} = 1. \end{aligned} \quad (2)$$

ここで N_a は望遠鏡 α のゲインの数であり、

$$\begin{aligned} S_{\mu_1, \mu_2}(g) &= \mu_1 \sum_{\alpha, l} w_{al} |g_{al} - g_{al-1}|^2 \\ &+ \mu_2 \sum_{\alpha, l} w_{al} (|g_{al}| - |g_{al-1}|)^2, \\ \mu_1, \mu_2 &\geq 0, \quad w_{al} = \frac{1}{t_l - t_{l-1}}, \end{aligned}$$

である。まず PRIISM で画像を求め、その画像を用いて (2) 式の最適化を行い、ゲインを推定する。今度はそのゲインを用いてビジビリティを校正して PRIISM によって画像を求める。これを交互に繰り返すことでビジビリティの校正とイメー

ジングが自動的に実行される (図1)。

新たに提案したビジビリティの校正法はまだPRIISMには実装されていない。現在、導入を目指している。

3. 高速化を目指して

電波干渉計で長年使われてきたCLEAN [4] は50年前から計算機上に実装され、計算機が発達した今では手元の汎用PCでアルマ望遠鏡の画像を自在にイメージングできるようになった。これに比べるとPRIISMでのイメージングは計算に時間がかかる。その理由は主にパラメータを選択する交差検証の部分とフーリエ変換である。

パラメータの調整が必要な場合、パラメータの組み合わせを複数回変えて試行し、最適な組合せを探索することは避けられない。交差検証では、データを分割し、それぞれのパラメータの組合せに対して分割した回数分、推定を繰り返すため、非常に時間がかかる。交差検証は予測誤差を最小にするパラメータを求める実行的な方法であり、統計学や機械学習分野で広く受け入れられている。しかし、あくまでもパラメータを決定するためのひとつの方法であり、他の方法を排除するものではない。

PRIISMのイメージング法では2つのパラメータがあり、前章で紹介したビジビリティの校正ではゲインを求めるために新たに2つのパラメータ μ_1, μ_2 を導入した。ゲインと画像の両方を推定する場合、合計で4つのパラメータの調整が必要である。この組み合わせを交差検証で推定するのは非常に時間がかかる。我々は、画像のフーリエ空間でのパワーとビジビリティとの誤差を用いてパラメータの組合せのよさを評価する方法を提案した [3]。この評価方法を採用すれば、パラメータの組合せ1つごとに1回だけ推定すればよいため計算時間は大幅に短縮される。この評価法も将来的にPRIISMに導入したいと考えている。

フーリエ変換については技術記事にあるよう

に、FFTとNUFFTを選択できるようになっている。現在はCPUを使った並列化は使えるが、将来的にはGPUでの演算を選択できるようにしたい。実現されればかなり高速にPRIISMでのイメージングができるだろう。

4. 3次元データ対応への拡張

研究紹介記事のとおり、特に原始惑星系円盤を対象に、PRIISMは大きな科学的成果を上げつつある [6, 7]。PRIISMは2次元画像のみに対応しているため、それらはダストの連続波放射成分にフォーカスしたものであった。一方、原始惑星系円盤の研究においては、円盤内の「分子ガスの運動」を直接捉えることも極めて重要であり、円盤内のガスがどのように運動し、惑星形成へと至るのかという物理的プロセスを理解するためには、分子輝線チャンネルマップの詳細な画像化が求められる。技術記事でも述べられた通り、PRIISMでは画像の高解像度化が期待できるため、従来の空間2次元データから速度 (周波数) 方向を加えた3次元データへの応用要求が急速に高まっている。

PRIISMを3次元データへ適用する場合、従来CLEANで行われていた方法と同様に、各チャンネルを独立したデータとして扱い、それぞれに対してPRIISMを用いた画像生成を適用してから重ね合わせるという手法が考えられる。しかし、実際の観測データを用いてこのアプローチを試みると、重大な問題に直面する。分子輝線はチャンネルごとに信号強度 (S/N比) や輝度分布の広がり異なっており、独立に最適化を行うと、チャンネルごとに最適なハイパーパラメータがばらついてしまう。結果として、あるチャンネルは滑らかに再構成される一方で、隣のチャンネルはノイズが多く解像度が異なるといった、チャンネル間で整合性が取れていない不自然な画像キューブに収束してしまう。ガスの連続的な運動を議論する上で、このチャンネル間の不連続性は致命的となる。

この問題を解決するために、各チャンネルを独

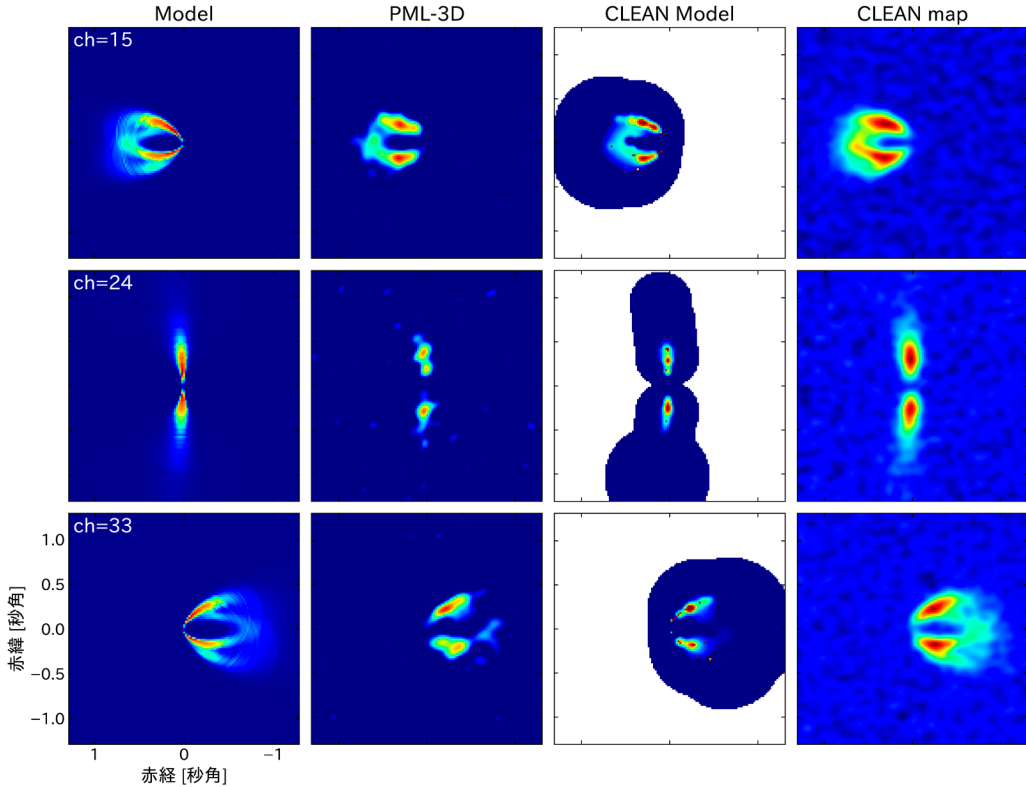


図2 3次元モデルデータに対する正則化最尤法による画像化の結果. 左から, 放射モデル (Model), 本検証で作成した画像 (PML-3D), 比較のためのCLEANコンポーネントマップ (CLEAN Model), CLEANマップ (CLEAN map) を示す. 50チャンネルの中から15, 24, 33チャンネルの画像を抜き出している.

立に扱うのではなく, 3次元ビジビリティデータ全体を一度に入力とし, 速度方向にも制約項を取り入れて, 直接3次元画像を再構成する新しいアルゴリズムを取り入れる. 従来の空間方向の制約項に加え, 新たに「チャンネル方向の制約」を追加した問題設定とする. チャンネルを表す添字を c , 各チャンネルのビジビリティと画像をそれぞれ v_c と $\mathbf{x}_c$ とし, 以下の目的関数を最小化する3次元画像 $\{\mathbf{x}_c\}$ を求めることで画像を生成する.

$$\min_{\{\mathbf{x}_c\}} \sum_c \left[\sum_k |v_{c,k} - \mathcal{F}_{c,k}(\mathbf{x}_c)|^2 + \lambda_1 \sum_{ij} |x_{c,ij}| + \lambda_{\text{TSV}} \text{TSV}(\mathbf{x}_c) + \lambda_c \|\mathbf{x}_c - \mathbf{x}_{c-1}\|_2^2 \right]$$

第4項にあるチャンネル方向の制約を導入するこ

とで, 速度方向に対して輝度分布が連続的に変化するというガスの物理的な運動の要請を数学的に組み込み, チャンネル間の不自然な途切れや解像度のばらつきを抑制する. このアルゴリズムをPythonで実装し, 擬似観測データを用いた検証を行った.

原始惑星系円盤を模した一酸化炭素分子 (CO) の分布モデルから生成したALMAの擬似観測データに対し, 本手法を用いて3次元画像の再構成を行った (図2). 画像は $256 \times 256 \times 50$ ピクセル (空間 $\times$ チャンネル) とやや小さいサイズではあるものの, 1つのハイパーパラメータのセットのもとで, おおよそ数十秒程度という実用的な時間での画像生成に成功している. 画像をCLEANによる結果と比較すると, 全体の分布の広がり

CLEANマップ（CLEANビームで畳み込まれた最終画像）と同様の傾向を示した．CLEANの推定結果であるCLEANコンポーネント分布と比較すると，CLEANコンポーネントは点源もしくは一定の広がりを持つガウシアン分布の集合体として表現されるため，人為的な境界や不連続な斑点模様が目立ってしまうのに対し，本手法での画像は，より連続的で滑らかな，現実的なガス放射の分布を直接的に再現できている．

擬似データでの成功を踏まえ，TW Hyaと呼ばれる有名な原始惑星系円盤をもつ天体の実観測データ [8] に対する応用テストも実施した．その結果，モデルデータ同様に大まかな空間・速度構造の再現に成功し，従来法のCLEANよりも解像度の高い，鮮明な画像キューブデータに収束する様子が確認できている．このように，PRIISMで用いられる画像化手法は，3次元データに対する拡張も現実的であることが見えつつある．一方で，強度やノイズ評価といった科学解釈を行う上での現実的な問題も残されており，今後はそのような課題に取り組みつ，実用化に向けたチューニングを進めていく．

5. ま と め

近年，CLEAN以外の新たなイメージングの方法の研究が盛んになっている [9–11]．EHTによるブラックホールシャドウの画像 [12] もこうした流れに勢いをつけることになったのだろう．

ブラックホールシャドウの成果に触発され，銀河分野でも超解像を目指した新たなイメージング法を用いる研究が進みつつある．しかし，銀河や活動銀河核のデータでは，極端にフラックスの異なる構造が同一視野内に共存することが多く，単純なスパース項だけでは安定した再構成が難しい場合がある．特に，強い中心成分やジェット構造の残差が，周囲の微弱なサブストラクチャーや多数の淡い天体の推定に影響を与えやすい．さらに，銀河画像は点源だけでなく拡散的・階層的な

構造を含むため，単一スケールのスパース表現では十分でないことも多い．銀河分野への本格的な応用のためには，多重スケール基底や空間適応的正則化，あるいは物理的事前情報を組み込んだ推定法など，より柔軟な枠組みの導入が重要になると考えられる．

EHTではSgr A* の画像化に際して，画像を観測ビジビリティの条件付きでの事後分布からサンプルする方法 [13] が実装され，バイズ統計に基づくイメージング法も用いられている [14]．EHT以外では，医用画像処理で研究が進んでいるニューラルネットを用いたPnP（Plug-and-Play）方式を電波干渉計のイメージングに用いた方法も提案されている [15]．SKAやngVLAなど，次世代の電波干渉計ではCLEANだけでなく，さまざまなイメージング法が使われることになるだろう．この30年間の信号処理や機械学習分野の革新的な進歩を知っていれば，こうした流れは当然である．

翻って日本国内を見渡すと，残念ながら今後の電波干渉計イメージングのアルゴリズムやツールの研究を見ることは稀である．PRIISMを公開してから，CLEANと比較した機能や速度を問われることがほとんどである．

PRIISMはCLEANとは異なる数理的基盤を持った方法である．本稿で示したように，開発課題はまだ残っている．我々は本務の合間に開発を進めているが，思うように進んでいない．CLEANがそうであったように，新たな方法は育てていかなければ使いやすいいものにはならない．興味のある方にはPRIISMの改善，開発に参加していただけると大変うれしい．

謝 辞

秋山和徳氏，小杉城治氏，本間希樹氏，所司歩夢氏，谷口暁星氏，山口正行氏はじめ，これまでPRIISMの開発に関わってくださった方々，そして天文月報編集委員の小山翔子氏に感謝申し上げます．

ます。本稿で紹介した研究の一部はJSPS科研費JP24K07097の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Nakazato, T. & Ikeda, S., 2020, *Astrophysics Source Code Library*, 2006.002
- [2] Nakazato, T., et al., 2020, *Proc. SPIE*, 114532 V, 11
- [3] Ikeda, S., et al., 2025, *PASJ*, 77, 260
- [4] Högbom, J. A., 1974, *A&AS*, 15, 417
- [5] ALMA Partnership, 2015, *ApJL*, 592, 808, L3 & L4
- [6] Yamaguchi, M., et al. 2024, *PASJ*, 76, 437
- [7] Shoshi, A., et al. 2025, *PASJ*, 77, 572
- [8] Nomura, H., et al. 2021, *ApJ*, 914, 113
- [9] Carrillo, R. E., et al., 2012, *MNRAS*, 426, 1223
- [10] Dabbech, A., et al., 2015, *A&A*, 576, A7
- [11] Junklewitz, H., et al., 2016, *A&A*, 586, A76
- [12] EHT Collaboration, 2019, *ApJ*, 875, L1 & L4
- [13] Broderick, A. E., et al., 2020, *ApJ*, 897, 139
- [14] EHT Collaboration, 2022, *ApJ*, 930, L14
- [15] Terris, M., et al., 2025, *MNRAS*, 547, 1608

The Future Prospects of the ALMA Imaging Tool PRIISM

Shiro IKEDA,¹ Takashi TSUKAGOSHI² and Tsutomu T. TAKEUCHI³

¹*The Institute of Statistical Mathematics, 10-3 Midori-cho, Tachikawa, Tokyo 190-8562, Japan*

²*Ashikaga University, 268-1 Omaecho, Ashikaga, Tochigi 326-8558, Japan*

³*Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8602, Japan*

Abstract: We have developed and released an imaging tool, PRIISM, for the ALMA telescope. PRIISM is still under active development. We plan to continue improving the software by enhancing its fundamental capabilities for radio interferometric imaging, achieving higher computational performance, and implementing features not available in CLEAN. In this article, we describe these future prospects and directions for further development.