「ALMAを利用した太陽系天体観測セミナー」開催報告

佐川 英夫[1]，中川 広務[2]，前澤 裕之[3]

1. はじめに：開催の背景

南米チリのアタカマ高地(標高5000 m)に建設中のアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)が初期科学運用を開始してから二年が経つ．干渉計を構成する電波望遠鏡(アンテナ)が最終的な本格運用のおよそ4分の1の台数という状況でのスタートではあったが，その段階においてすら，ALMAの観測感度は既存のサブミリ波干渉計(ハワイSMA)の20倍以上を達成していた．その後ALMA施設の建設も着実な発展を見せており，それにともなって，ALMAの観測性能は既存の電波天文学の常識を覆す域に達しつつある．

ALMAの秀でた観測性能を最大限に活用していくため，また，異分野の研究者でもALMAを利用できるように，国立天文台チリ観測所ではALMAワークショップの公募を毎年行っている．本研究会「ALMA初期科学運用における太陽系天体観測」もその活動の一環であり，昨年度より年二回のペースで研究会を開催している．本研究会では，ALMAを利用することで太陽系惑星科学にどういった新規サイエンスが拓けるのかという視点で，異なる研究フィールド(惑星大気研究，固体表層環境研究，プラズマ圏研究，太陽系形成理論研究など)に跨る惑星科学研究者間での情報交換を行うことを会の趣旨とした．また，応募予定の観測提案書の完成度を如何に高めていくかといった具体的な議論も行っている．以下では今年4月および10月に開催された研究会に関して，講演内容の紹介を行う．

1. 情報通信研究機構
2. 東北大学
3. 大阪府立大学
sagawa@nict.go.jp

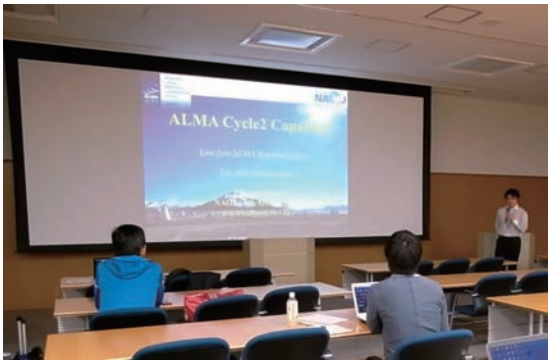

図1：研究会の様子．

2. 講演内容の紹介

表1に今年度の研究会アジェンダを示した．開催会場の情報通信研究機構を中継し，TV会議接続を利用して遠隔地(東北大学や大阪府立大学，神戸大学，福岡大学など)からも複数の参加者があった．

2.1 セッション1

第一回，第二回の研究会どちらも，国立天文台のALMA東アジア地域センター(EA-ARC)からALMAの観測性能に精通している関係者に研究会への参加を依頼した．実際のALMAの運用状況や観測性能に加え，電波干渉計の観測原理の概要に関しても講演があった．とくに後者の説明は，干渉計観測には馴染みが無いが潜在的にALMAを利用する可能性が在るという人達

表1：「ALMA初期科学運用における太陽系天体観測」平成25年度会合内容．第一回と第二回の会合プログラムをセッション毎にまとめ，整理したものを示す．

開催日：第一回 4月22日，第二回 10月28日

セッション1　[ALMAステータスレポート]

西合 一矢，秋山 永治（国立天文台チリ観測所EA-ARC）

- Cycle-0, Cycle-1 におけるALMA運用実施状況
- Cycle-1における観測提案の統計
- Cycle-2におけるALMA観測性能，ACAの紹介

セッション2　[Cycle-0, Cycle-1での観測]

- Cycle-1で採択された太陽系天体観測の紹介およびデータアーカイブの利用　佐川 英夫（情報通信研究機構）
- Cycle-0で取得されたデータ解析の紹介：近傍銀河観測プロジェクト　中島　拓（名古屋大学）

セッション3　[Cycle-2 への観測提案に向けて]

- 惑星大気GCM 研究から期待される地上観測の展開　黒田 剛史（東北大学）
- 太陽系天体の電波観測への期待 ～氷衛星のサイエンス～　関根 康人（東京大学）
- 火星大気の上下結合過程が大気散逸に及ぼす影響　中川 広務（東北大学），ほか
- エンセラダスプリューム：カッシーニ探査による知見とALMAでの観測可能性検討　関根 康人（東京大学），兒玉 賢哉（東京大学）
- 木星衛星における酸素同位体比観測に関するブレインストーミング　佐川 英夫（情報通信研究機構），関根 康人（東京大学）

セッション4　[総合議論]

にとって非常に重要である．先ずはALMAの運用状況や観測提案書審査に関する報告が行われた（西合氏）．ALMA Early Science Cycle-0およびCycle-1という過去二度の観測提案募集に際しては，世界中の研究者からそれぞれ1000件前後もの観測提案が応募され，その中から優先度が高いと評価された観測提案が実施されている．観測提案は，観測代表者の所属に従って，欧州，北米，東アジア，そしてチリという地域別の窓口に応募される．興味深いのは，どの地域からどれだけの観測提案が出され，そのうち何件が“Highest Priority”として採択されたのかといった，観測提案の審査に関する統計情報がかなり詳しく公開されている点である．これにより，地域枠ごとでの採択率の差なども見ることが出来る．東アジア枠は，欧州や北米枠と比較して競争倍率において有利な状況となっている．

秋山氏からはALMAの次期観測サイクルであるCycle-2の観測提案募集に関して詳細な説明があった．Cycle-2は2014年6月から2015年10月までのおよそ1年半におよぶ観測実施期間となる（観測提案の募集締め切りは日本時間で2013年12月6日）．前回までの観測サイクルからはALMAの観測性能としても更なる性能のバージョンアップがあり，特に二つの観測周波数帯（バンド4：125–163 GHz，バンド8：385–500 GHz）が新たに実現されたことは本稿でも特記しておきたい．これにより84 GHzから720 GHzまで，広い周波数帯が観測に利用できることとなる．高い方二つの観測周波数バンドを除けば，口径12 mのアンテナ34台を最大で1.5 kmの基線長に達する大規模配列上に配置することが出来る．300 GHz帯での観測を例にとると，その最高空間分解能は0.12秒角となる．

Cycle-2における科学運用時間は2000時間程度と想定されている．この中には，Cycle-1で採択されたにも関わらず期間内に観測が実施できず，Cycle-2に移行されてくる提案も含まれる予定である．

2.2 セッション2

冒頭にも述べたが，ALMAは既にCycle-0およびCycle-1という初期科学運用を実施している．それらの観測サイクルでどういった太陽系天体の観測提案が採択されたのかに関して紹介が行われた（佐川）．現在までに観測提案が採択されている太陽系天体は，金星（C-0, 1），土星（C-0），イオ（C-0, 1），タイタン（C-0, 1），海王星（C-1），彗星Elenin（C-0），彗星Pan-STARRS（C-1）に限られている（天体名の後ろのC-0,1はそれぞれCycle-0, -1での採択を示す）．こうした観測データが観測提案者に専有される期間は，データが観測提案者に配布されてから一年間であり，その後はALMAデータアーカイブを通して一般の利用者に公開されている．その公開データには，観測生データに加えて，ALMA地域センターで観測天体画像の復元までデータ解析処理を行ったサイエンスデータも公開されている．つまり，電波干渉計のデータ処理（キャリブレーションやデコンボルーション）の経験が無い利用者でも，ある一定のレベルに達した電波画像を直ぐに取得することが出来る仕組みになっている．こうしたアーカイブを積極的に利用していきたい．

Cycle-0で観測された土星データに関しては本稿執筆時の段階で既にデータアーカイブで公開されており，それを見ればALMAによる太陽系惑星観測の質を実感することが出来る．アーカイブデータには土星大気中のCOの観測結果も含まれており，土星ディスクの周縁部分にCOのスペクトルが高感度で観測されている．

中島氏からはCycle-0での近傍銀河観測プロジェクトの実データ解析例が報告され，ALMAでの観測実施からデータ取得，そして画像復元のデータ解析までの流れが具体的に紹介された．印象的であったのは，一つのALMA観測提案から既に8本ものジャーナル論文が準備されつつあることである．これには，ALMAデータの威力もさることながら，データ解析を行う研究体制を上手く機能させることの重要性を認識させられた．折角ALMAに観測提案が採択されて観測が実行されても，一年後にはデータが一般公開されるので，データ解析および論文化を短期間に進められるように予めよく準備しておくことが重要であろう．

2.3 セッション3

このセッションでは，ALMAに期待される太陽系惑星科学の話題が講演されている．サブミリ波帯観測の特徴でもある大気微量成分の観測や高い周波数分解能を活かした温度・風速分布情報の導出を通して惑星の大気循環を理解しようという講演（黒田氏）や，探査機による惑星プラズマ圏の観測にALMAによる地上観測を連携させて，超高層大気の上下間結合を観測的に制約していくという講演（中川）が行われた．本稿では，関根氏らから提供されたエンセラダス観測の話題に関して紹介をしたい．

土星衛星エンセラダスの南極付近から噴出するプリュームの組成を明らかにすることは，太陽系の形成を理解するうえでも，また，太陽系におけるハビタビリティを議論するうえでも非常に重要な研究課題である．エンセラダスプリュームの組成は，近年カッシーニ探査機によるサンプリング計測によって調べられてはいるが，計測測器の質量分解能の問題やサンプリング時の大きな相対速度によってサンプルが熱分解しているなど，問題点を抱えているのも事実である[1]．そこで，プリュームの組成をALMAからリモートセンシングできないだろうかというのが関根氏らの提案であった．Cycle-2におけるALMAの最高空間分解能は0.1秒角前後に達する．この分解能は，地球から観た場合のエンセラダスプリュームの広がり（～0.05秒角）とそこまで大きくは掛け離れていない．逆に言えば，ALMA以外の地上観測施設を利用してのエンセラダスプリューム観測は限り無く難しいとも言える．ミリ波・サブミリ波帯には，プリュームのソースであるエンセラダス内部海の情報を制約するために重要と考えられているHCN, CO, NH_3, CH_3OHなどのラインが多数存在する．果たしてCycle-2におけるALMAの観測感度で上記分子が検出できるのか？兒玉氏からはこの点に関する初期検討の結果が紹介された．プリューム内の分子の存在量や温度，そしてALMAの空間分解能に対するプリュームの空間分布（深宇宙やエンセラダス本体の放射も同時に観ることになる）など，いくつかの仮定を置いたうえでの見積もりではあるが，HCNに関

しては十分に現実的な観測積分時間で有意な信号が得られることが示された．今後，より現実的な感度計算が行われるが，地上からエンセラダスのプリュームを観測できる(かもしれない)というのは，まさにALMAならではのサイエンスではないかと感じられた．

2.4 セッション4

総合議論の場では，参加者からの様々な視点で，ALMAを利用した太陽系科学に関する議論が行われた．主な話題を以下に紹介する．

- ALMAとのシナジー観測も見据え，東北大学惑星研究グループなどが現在ハワイハレアカラに建設中の赤外望遠鏡を利用した他波長間観測の展開や，大阪府立大学(前澤)などが野辺山で開発運用を行っている惑星中層大気監視専用10 mミリ波望遠鏡SPARTによる長期モニタリングとALMAによるスナップショット的観測を連携させるなどといった観測アプローチも検討されており，期待がかかる．
- 数値モデリングや理論研究者との共同研究によって，ALMAを利用した新規観測テーマを見いだしていきたい．また，日本が今後行っていく太陽系探査ミッションにALMA観測も効果的に関連させられるであろう．例えば，ALMAで木星やガリレオ衛星を観測することは，木星圏探査ミッションJUICEの開発にも大きく貢献する．

3. 結びと謝辞

以上，二度の研究会の開催内容を駆け足で報告した．冒頭で述べた，「異なる研究分野に跨る惑星研究者でALMA時代の太陽系惑星観測を議論していく」という会合趣旨は達成できたと思われる．こうした試みが成功したのは，太陽系惑星科学に対してALMAが高い有効性を保持しているからに他ならない．この研究会開催(あるいは本記事)を通して，これまで以上に多くの惑星科学研究者にALMAへの新たな関心を持って貰うことが出来れば幸いである．現時点ではCycle-0, -1 のALMA太陽系観測データを利用したジャーナル論文は出版されていないが，それも時間の問題だと思われる．どういった成果が出てくるのか，大きな期待を持って待ちたい．

最後になるが，旅費援助を含めて研究会開催のサポートをして頂いた国立天文台，同チリ観測所およびEA-ARCの方々，そして，研究会を盛り上げてくれた参加者の方々に研究会世話人として謝辞を述べたい．

参考文献

[1] 関根康人, ほか, 2012, 遊星人 21, 229.