電波干渉計における像合成技術と動き始めた ALMA*

永井 洋**, 黒野 泰隆*** (国立天文台)

Technique for Radio Interferometer Imaging with ALMA

Hiroshi Nagai and Yasutaka Kurono

1. 天文学と電波天文学

古来、人間は天空の星の輝きやその動きに魅せられてきた。星の並びや太陽・惑星の動きに宗教的な価値観を重ねていたことから、人々は星に対して特別な感情や畏敬の念を持って接してきたことがうかがえる。また、方角を確認する手段、季節のうつろいや地球上で起こる自然現象のタイミングを星の年周運動を通じて予測するなど、生活に結びついた実用的な道具としても星の存在は人間と密接な関係があった。

天体現象を理解することが学問的な地位にまで高められるようになったのはガリレオ・ガリレイが登場してからである。近代天文学の幕開けである。天体現象の背後にある物理法則が何かを理解する、あるいは天体現象から新たな物理法則を発見するという時代が到来し、物理学の進展に大きな影響を与えた。その後、20 世紀に入り、巨大望遠鏡の登場や写真技術の進展に伴い、天文学は飛躍的な進展を見せる。現代の宇宙観の基礎が確立されたのもこのころである。

20 世紀中ごろまでは、天文学の観測と言えば、もっぱら可視光望遠鏡によるものであった。ところが、1932 年にアメリカ・ベル研究所のカール・ジャンスキーが宇宙から電波が飛来していることを発見する。電波天文学の幕開けだ。電波はそれまでの可視光では見えなかった低温（数 10 から数 100 ケルビン）のガスからの放射の観測を可能とした。また、分子が出す輝線放射を観測することに成功し、様々な分子が宇宙に存在していることを明らかにした。特に、低温のガスが自己重力によって収縮し、そこから星が生まれるという考え方が確立されたのも、電波観測によって低温ガスの観測ができるようになった功績が大きい。開口合成技術の発明、パルサーの発見、宇宙背景放射の発見、連星パルサー、宇宙背景放射の揺らぎの発見はいずれも、電波観測によるものであり、ノーベル賞を受賞している。現代天文学・宇宙物

理学において電波天文学が多大な功績を残しているのだ。

2. 電波天文学で用いられる装置

2.1 電波望遠鏡概要

宇宙からやってくる電波を観測する望遠鏡とはどういったものなのだろうか？実は私たちの生活に身近に存在している「アンテナ」とそれに関する電波計測技術によって、電波望遠鏡は支えられている。例えば、日本では長野県の野辺山にある開口直径 45m のアンテナが電波望遠鏡の代表だ(Fig. 1)。電波とは一般に数百 GHz 以下の周波数帯を指すことが多い。観測する周波数帯に応じてアンテナの形状は様々であるが、いずれにしても微弱な電波を集めるために巨大な開口面積を持つ。野辺山 45m 望遠鏡の場合、パラボラで集められた電波は副鏡で反射された後に、受信機室に送られる。そこで電気信号に変換された後、低雑音受信機を使って信号を増幅する。高周波の信号のままでは扱いづらいため、低周波（だいたい数 GHz 帯）の信号に周波数変換を行う。特にミリ波と呼ばれる波長がミリメートルの電波帯（周波数でいうと 30GHz から 300GHz）になると、直接増幅するのが難しいため、超電導ミキサを使って周波数変換された後に、低雑音受信機で増幅される。電波の周波数方向の強度情報を得るために電波分光を行

Fig. 1 国立天文台野辺山宇宙電波観測所の 45m パラボラアンテナ

* 原稿受付 2012 年 1 月 17 日

** 大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 国立天文台 (〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1 E-mail: hiroshi.nagai@nao.ac.jp)

*** 大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 国立天文台

う。以前は圧電素子などに代表される音響光学素子を用いてアナログ的に分光する方法が用いられてきたが、近年ではデジタル的に分光を行うことが多い。その後電波強度を測定するための検波を行う。こうして、観測された電波の強度と周波数の情報が取得され、さらには天球面上の強度分布を測定することで、電波の「(二次元)空間」,「強度」,「周波数」の3次元情報を取得している。

2.2 電波干渉計と開口合成技術

2.2.1 電波干渉計と開口合成技術の仕組み

さて、電波観測を行ううえでの性能を表す指標の一つに、分解能がある。より細かく天体を撮像するためには分解能が高いことが好ましい。分解能 θ は波長 λ とアンテナ口径 D を用いて、 $\theta = \lambda / D$ であらわすことができる。例えば、野辺山 45m 望遠鏡の場合、波長 3 mm の電波を観測した場合の分解能は約 0.2 分角である。人間の視力 1.0 はちょうど 1 分角を分解できる分解能に相当するので、人間の目よりもわずかに分解能が良い程度である。電波は可視光などに比べて波長がずっと長いので、45m という巨大な開口を用意しても、それほど高い分解能を得ることができない。そこで考え出されたのが電波干渉計だ。一つの巨大な電波望遠鏡を作ることは難しいが、複数の望遠鏡で取得された電波の位相情報を損なうことなく、コヒーレントに干渉させることで、望遠鏡と望遠鏡間の距離に相当する開口で観測した状況と同じ分解能を得ることができるというものである。この技術は 1940 年代に始まり、その後 1960 年代に入ってから、地球の自転を使用した開口合成技術によって天体の電波画像が取得できることが実証され、ケンブリッジ大学のマーティン・ライルは 1974 年にノーベル賞を受賞している。

個々のアンテナで取得された電波は、2.1 章で説明した周波数変換・信号増幅を経た後、光信号に変換されて伝送される。複数のアンテナから光ケーブルを通して送られてきた信号は、1 か所に集められ、相関器と呼ばれる装置に入力される (Fig. 2)。ここでは、一つの基準となるアンテナに対して別のアンテナに電波が到来するまでの遅延時間を考慮して、複数のアンテナで取得された電波の位相をそろえる作業を行う。ここでの信号処理は近年、デジタル的に行われることが多い。相関器における作業はいわば「焦点合わせ」の作業である。単一のアンテナの場合、パラボラ面のどこで跳ね返った電波も焦点までの光路長は同じになるように設計されている。そのために、広い開口で集められた電波が打ち消し合うことなく、お互い強めあってくれる。干渉計の場合は、各アンテナが巨大なアンテナの 1 素子として機能し、複数のアンテナを用いて巨大な仮想的アンテナを形成している。その際の焦点合わせをするのが相関器の役割である。

現在稼働している最も大きい干渉計は、アメリカ・ニューメキシコにある Very Large Array (VLA) で、最大基線長は 40km にもなる。最高観測周波数 43 GHz で観測すると、分解能は約 40 ミリ秒角にもなる。また、

Fig. 2 代表的な干渉計の概略図

チリのアンデス山脈に建設中の大型ミリ波サブミリ波干渉計 ALMA は、これまで観測が難しかったサブミリ波 (波長が 0.1mm から 1 mm 程度) と呼ばれる波長帯の電波を観測することを可能にした干渉計で、最大基線長は 16km になる。最高観測周波数は 950GHz で、分解能は 10 ミリ秒角を切るところに到達する。

2.2.2 開口合成技術における像合成

干渉計のある 1 基線 (2 台のアンテナペア) に着目したとき、ある一瞬に取得される情報は、天体の輝度分布の 1 フーリエ成分だけである。つまり、1 基線の干渉計が感度を持つ領域は天球面上では縞模様として分布する。この縞の間隔は基線長に反比例し、基線長が長くなるほど縞々の間隔はせまくなる。いわば、アンテナ間隔に対応する空間周波数成分を通過させる「空間フィルタ」として干渉計は機能する。実際の天体の輝度分布は 2 次元的に分布しているので、干渉計のアンテナ配列は 2 次元的に分布するように配置する。また、なるべく多くのフーリエ成分を取得できるように、多くのアンテナを使って様々なアンテナ間隔になるようにアンテナを配置し、さらに地球回転を利用して基線長を変化させるなどの工夫をする。こうして取得された天体の輝度分布のいくつものフーリエ成分を 2 次元フーリエ変換することで天体の画像を作るのだ。

干渉計は高い分解能を得ることができる装置であるが、最短基線が作る空間周波数よりも小さい空間周波数成分を取得できないという欠点があるため、空間的にのっぺりと広がった天体輝度を描くのを不得意としている。後に詳しく述べる ALMA では、この欠点を補うために Atacama Compact Array (ACA) を導入し¹⁾、広がった天体画像を取得できるような工夫を施している。また、ACA の像合成をするための ACA 相関器の開発や²⁾、高精度画像化のためのアルゴリズムの開発で、日本が世界をリードしている。

3. 画像処理

干渉計によって取得されたフーリエ成分を 2 次元フーリエ変換することで画像を生成するわけだが、実際には

有限のフーリエ成分のみをサンプリングしているので、この作業だけでは正しい天体画像を作り出すことはできない。有限のフーリエ成分しかサンプリングできない影響は、画像上でサイドローブを生むことになる（干渉計の合成ビーム形状がサイドローブを持つ）。例えば、点状の電波源を観測したとしても、干渉計画像では真の輝度の周辺に多くのサイドローブが発生する。天体の構造が複雑になるほど、サイドローブと天体の輝度の切り分けが容易ではなくなる。

サイドローブを取り除く作業は deconvolution と呼ばれ、CLEAN という手法が最もよく用いられている (Hogbom 1974)³⁾。干渉計画像の中で強度の強い場所を見つけて、合成ビームを適当にスケリングして画像から差し引くことで、サイドローブの影響を取り除くという作業を行う。この方法は、どれが天体の構造でどれがサイドローブ成分かを判定する基準が曖昧であるために、最終的に得られる画像の質に個人差が生じることがある。そこで CLEAN 以外に、最大エントロピー法を用いるなど、いくつかの解析方法が試みられているが、いずれにしても干渉計で得られた画像の処理には決定版と言えるものがなく、今後の発展が望まれる分野である。

4. 大型ミリ波サブミリ波干渉計 ALMA

4.1 ALMA の装置概要と科学目標

ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) は現在、南米チリの北部アタカマ砂漠の標高約 5000 メートルの高原 (AOS: Fig.3) に建設中の大型電波干渉計である。アタカマ砂漠は年間降水量が 100 ミリ以下でほぼ年中晴天なこと、さらに標高が高いため水蒸気による電波吸収の影響を受けにくいことなどから、主な観測波長域であるサブミリ波も効率良い観測が可能となる。

ALMA は直径 12m のアンテナを 50 台組み合わせるアンテナ群と、Atacama Compact Array (ACA) で構成される。これらアンテナは全て移動可能であり、アン

Fig. 3 ALMA Observatory has three main locations: Operations Support Facility (OSF), Array Operations Site (AOS) and Santiago Central Offices (SCO). Credit: ALMA (ESO / NAOJ / NRAO)

テナ間隔を最大約 18 キロメートルまで広げることで、直径 18 キロメートルの電波望遠鏡に相当する空間分解能 (= 視力) を得ることができ、ミリ波・サブミリ波領域では世界最高の感度と分解能を備えた望遠鏡となる (Fig. 5)。ALMA は、東アジア、北米、ヨーロッパの国際共同プロジェクトであり、受入れ国であるチリは土地の提供と ALMA 建設・運用について便宜を図ることで参加している。日本は高精度の干渉計システム・ACA を構成するアンテナと相關器、サブミリ波を中心とする 3 種類の受信機などを担当している。

宇宙空間にある塵やガスは非常に低温で、光や近赤外線を放射しないため、その様子を可視光の望遠鏡で見ることが不可能である。しかし、そのような超低温の塵やガスはミリ波やサブミリ波を放射するため、電波の望遠鏡によって暗黒の宇宙の姿を直接見る事が可能となる。今までは、技術的な困難さと空気中の水蒸気の吸収により、サブミリ波での本格的な観測は進んでこなかったが、ALMA の建設によって飛躍的な進歩が期待される。宇宙が誕生して間もない頃の形成初期の銀河や、星の誕生や太陽系のような惑星系の誕生、有機分子などの生命に関連した物質など、可視光では見えない暗黒の宇宙を詳

Fig. 4 CLEAN による干渉計画像処理の例。左は干渉計によって取得された天体画像で、右はそれに CLEAN をほどこした例を示している。

Fig. 5 Artist rendering of the ALMA Array, in an extended configuration. © ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

細に調べることが可能となる。我々の太陽系がどのようにして誕生したのか、その太陽系がある銀河系がどうやって形成されたのか、そして我々生命の素となる材料はどこからやってきたのか、これらの謎を解き明かし、我々のルーツを見出すことを可能にする観測結果が得られると期待される。

4.2 現状と今後のスケジュール

これまで建設と評価活動を行ってきた ALMA は、2011 年に入るとアンテナの数も増え、実際の観測が可能となる段階に入り、いくつかの試験観測の結果が得られた。そして 2011 年 6 月には世界中の研究者からの観測提案が集められ、2011 年 9 月から初期科学運用をスタートするに至っている。この第一弾の初期科学運用は、16 台の 12m アンテナを用いて、2012 年 1 月現在も行われており、2012 年 9 月まで続く見込みである。最終的なアンテナ台数 66 台と比べるとまだ少ないものの、その高性能のアンテナ、受信機その他装置群と標高 5000m の好条件のもとで得られる観測データはすでに既存の望遠鏡で得られる質を遥かに凌ぐものである。この科学運用を進めつつ、平行してさらなる建設と装置の試験・評価活動も絶え間なく行われている。その結果、2012 年 11 月から始まると予定されている次の科学観測運用ではさらにアンテナの台数は二倍、そして日本の担当となっている ACA システムの一部が加わる予定であり、さらに高精度な電波画像が描かれ宇宙の新たな姿が次々と明らかになるだろう。次にその ACA を用いた ALMA における電波干渉計イメージングの技術について解説する。

5. ALMA によって可能となるイメージング技術

5.1 Atacama Compact Array と ACA 相関器

ACA は 7 m のアンテナが 12 台と 12m のアンテナが 4 台で構成されるシステムである。ALMA は大型電波干渉計であると紹介したが、厳密には純粋な電波干渉計ではなく、少々特殊な観測システムを採用している。

干渉計単独では、その最小基線長以下に相当する空間情報は取得できず、広がった天体構造を画像として再現することが困難であることを述べた。この ACA は、ACA 以外の 50 台の 12m アンテナアレイだけでは取得できない低空間周波数成分を、基線長の短いコンパクトな配列をもつ 7 m アレイと、12m アンテナを単一型電波望遠鏡（以下「単一鏡」）として使用することで取得することを目的としている (Fig. 6)。これら 12m アレイと、ACA の 7 m アレイそして 12m 単一鏡で得られたデータを結合して最終的な電波画像を生成するのである。ALMA はこの様な観測手法とデータ画像化技術を用いることで、高分解能かつ天体の空間情報の欠損の無い、高い質の電波画像を得ることを目標としている。

2.2.1 節で紹介したように、ACA のアンテナで取得

Fig. 6 ALMA consists of two different types of arrays: 12m-Array to obtain spatial frequency components higher than 15 m; and Atacama Compact Array (ACA), composed of TP-Array and 7-m Array, to cover zero- and short-baseline components. (figure taken from Kamazaki et al. 2012)

された電波は、最終的に ACA 専用の分光相関器で処理される (Fig. 7)。分光相関器はある周波数帯域に渡る受信電波をある周波数分解能で分光するとともに、二つの（自己相関の場合はひとつの）アンテナで受信された時系列の電気信号をフーリエ変換し相関処理することで天体の電波強度分布のフーリエ成分を取得する。ACA 相関器は 7 m アンテナ 12 台の電波干渉計と 12m アンテナ 4 台の単一鏡の観測を同時に行い、相互相関情報と自己相関情報を出力することができる。また ALMA では、二つの直交偏波成分を含む 4 つの 2 GHz 周波数帯域が相関器への入力となり、分光相関器はそれらの信号を複数の異なる周波数分解能での分光処理を同時に行うことが可能である。電波天文学では、星間分子の発する輝線を観測しその既知の周波数からのずれ、つまりドップラー偏移により天体の速度情報を知ることができる。ALMA は最高で 31.25MHz の帯域を 8 k (=8,192) チャネルで分光できる能力をもつが、これは例えば 230GHz の観測では 0.005 km s⁻¹ の速度分解能に相当し、この速度間隔で観測天体のイメージを描き出すことでその運動を詳細に調べることができる。

5.2 モザイクングと単一鏡とのデータ結合技術

ALMA は近年の電波天文学における様々な開発技術の発展によって実現された大型の電波観測システムである。同様に、干渉計観測に特有の弱点を克服するためのデータ解析手法についてもこれまで様々な発展があり、

Fig. 7 ACA Correlator at AOS technical building. Credit: NAOJ

Fig. 8 Imaging simulation using the techniques for wide-field imaging with interferometer. (a) Model image used (Cassiopeia A) and field of views of interferometric mosaicing observation (open circles which show the Full-Width Half-Maximum of primary antenna beam). (b) Interferometric mosaiced image. (c) Interferometric mosaiced and single-dish-combined image.

ALMA による高精度の電波イメージングに応用される。その主たるものがモザイクングと単一鏡とのデータ結合技術である。

5.2.1 モザイクング観測とイメージング

干渉計の素子アンテナは天球面のある特定の領域でしか感度を持たない。その領域の大きさは 2.2.1 節で解説した $\sim \lambda/D$ 程度となり、これが干渉計観測の「視野」ということになる。電波干渉計はこの視野内の電波画像しか描くことができないため、それより広い領域の電波イメージを取得するにはモザイクング観測という手法を用いる。モザイクングは、複数視野の観測データを結合して広い電波画像を得る技術である。観測する波長が短くなるほど視野は狭くなるため、サブミリ波を観測する ALMA では非常に重要な観測手法である。

多視野にわたる干渉計観測データから広領域の電波画像を生成する簡単で単純な方法として、各視野毎の電波画像を独立に作り、それらを適当な重みで貼り合わせるやり方があり、このような手法は古くから行われていた。一方で、干渉計観測で測定できる離散的なフーリエ成分によって生成された歪んだ電波画像から真の画像を推定するため、CLEAN や最大エントロピー法などの非線形な画像再構成のプロセス (deconvolution) を必要とすることを 3 節で述べた。このプロセスに着目し、Cornwell はこの deconvolution による真の画像の推定に、多視野のデータを総合的に用いたモザイクング画像を生成、より優れた広領域画像を得られることを提案した⁴⁾。このように、複数の情報を用いた deconvolution によってその精度を上げる手法は "joint" deconvolution と呼ばれている。彼は、全ての視野データに最大エントロピー法を用いることで、それら観測データセット全体を矛盾なく再現する電波画像を推定できることを示した。この方法は、一視野の観測では区別することができない素子アンテナ開口内の空間周波数情報が、モザイクングによって分離することが可能になることで知られてる。その事実は初め Ekers & Rots によって示され⁵⁾、その後 Cornwell によって数学的枠組みが固められたのである⁴⁾。一方、Sault らは複数視野それぞれの dirty image の線形結合により広領域の dirty image をまず生成し、その画像に対して deconvolution を行う方法を提案した⁶⁾。彼らはオーストラリア望遠鏡を用いた小マゼラン雲に対する 320 視野もの多視野観測データにこの方法を適用し、Cornwell のアルゴリズムの結果と同等の質の画像が得られることを示した。

Fig. 8 に、本稿で紹介する技術を用いた電波干渉計データの画像化のシミュレーションの結果を示す。Fig. 8-(a) がモデルとして用いた超新星残骸 Cas A の画像であり、37 視野で天体の広がりほぼ全体をカバーする干渉計観測をシミュレートした。干渉計視野は円で示されている。その結果得られたデータを、実際の観測データの扱いと同様の方法で画像化した。Fig. 8-(b) に示す

画像は Sault らのアルゴリズムで生成したがモザイク干渉計電波画像である。

5.2.2 単一鏡とのデータ結合イメージング

2.2.2 節, 3 節で解説した通り, 電波干渉計観測は天体輝度分布の構造に対して空間フィルタ的性質をもつ。この干渉計観測を改善するために, 単一鏡とのデータ結合の手法がある。単一鏡を用いた観測では天球面上を「スキャン」することで電波画像を得ることができる。この時, 空間周波数領域で考えると, このような電波画像を得る観測では周波数 0 (ゼロ) から単一鏡アンテナの口径に相当する空間周波数までの情報が得られる。つまり, 干渉計で取得できない低い空間周波数成分を単一鏡のデータで補完することが原理的に可能なのである。これがデータ結合の基本的な概念である。この手法は, ALMA における重要性から, 近年アルゴリズムや最適化などが議論されている。

実際に, データ結合して一つの電波画像を作るためのアルゴリズムは現在いくつも提案されており, 5.2.1 節で紹介した joint deconvolution のアルゴリズムもこのデータ結合イメージングに応用できる。Sault らはこの手法によって, モザイクにさらに単一鏡データを加えた電波画像を得ている⁷⁾。また, データを直接的に足し合わせて電波画像を得る方法としては, “hybridization method” や “pseudo-visibility method” が存在する。

Hybridization method は Weiss らによって提案された手法で, 単一鏡画像と, deconvolution された干渉計画像をフーリエ空間で合成する方法である⁸⁾。Pseudo-visibility method は, 古くは Bajaja & van Albada によって提案され⁹⁾, その後 Vogel 他¹⁰⁾, 黒野他¹¹⁾など, アルゴリズムに対する理解と改善がなされてきた。この手法では, 単一鏡観測で得られた電波画像から, 天体の低空間周波数成分のフーリエ成分を推定し, 干渉計データと合わせて画像化を行う。この手法の利点は, データの結合を行った後に deconvolution を行うことである。CLEAN 法などの Deconvolution は, フーリエ空間において干渉計データの不完全性を補間することであると解釈できる。このプロセスでは特に, 干渉計のみでは完全に情報の無い低空間周波数成分が単一鏡のデータで補われているため, 結果の信頼性が格段に上がるのである。

Fig. 8-(c)に示す画像は, 5.2.1 節で紹介した多視野の干渉計観測のシミュレーションにおいて pseudo-visibility method を用いて単一鏡データの結合も適用した場合の結果である。Fig. 8-(b)の干渉計データのみ画像に比べ, 広がった構造を見事に再現していることが一目瞭然に見て取れる。またそれと同時に, 干渉計データのみ画像とほとんど変わらない空間分解能も達成している。

6. まとめ

昨年, いよいよ ALMA は科学観測運用を開始するに至り, まだまだ更なる建設は進み 2013 年までアンテナ台数が増え続ける予定である。それと共に, 受信バンドの拡張や太陽・偏波観測などの観測の能力もこの先加わっていく。その様な中で, 取得されたデータからいかに高精度の電波画像を作るか, deconvolution 法や高領域イメージング法など, その手法の改良と最適化は電波観測によって切り開かれる天文学の発展にとって重要な位置を占める課題の一つである。さらなる手法の開発とその最適化などの検討は現在もそしてこの先も続く。ALMA の高精度の装置とそのイメージング技術によって描かれる新たな宇宙の姿に我々は今後驚かされることになるだろう。

参考文献

- 1) Iguchi, S., et al.: The Atacama Compact Array (ACA), Publ. Astron. Soc. Japan, Vol.61 (2009) pp.1-12.
- 2) Kamazaki, T., et al.: Digital Spectro-Correlator System for the Atacama Compact Array of the Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, To be published in Publ. Astron. Soc. Japan, Vol.64.
- 3) Högbom, J. A.: Aperture Synthesis with a Non-Regular Distribution of Interferometer Baselines, Astronomy and Astrophysics Supplement, Vol. 15 (1974), pp.417-426.
- 4) Cornwell, T. J.: Radio-interferometric imaging of very large objects, Astron. Astrophys., Vol.202 (1988) pp.316-321.
- 5) Ekers, R. D., Rots, A. H.: Short Spacing Synthesis from a Primary Beam Scanned Interferometer, Image Formation from Coherence Functions in Astronomy, D. Reidel (1979) pp. 61-66.
- 6) Sault, R. J., Staveley-Smith, L., Brouw, W. N.: An approach to interferometric mosaicing, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., Vol. 120 (1996) pp.375-384.
- 7) Sault, R. J.: Mosaicing with the Australia Telescope, Imaging at Radio through Submillimeter Wavelengths, Astronomical Society of the Pacific (2000) pp.267-274.
- 8) Weiß, A., Neininger, N., Hüttemeister, S., Klein, U.: The effect of violent star formation on the state of the molecular gas in M 82, Astron. Astrophys., Vol.365 (2001) pp.571-587.
- 9) Bajaja, E., van Albada, G. D.: Complementing aperture synthesis radio data by short spacing components from single dish observations, Astron. Astrophys., Vol.75 (1979) pp. 251-254.
- 10) Vogel, S. N., Wright, M. C. H., Plambeck, R. L., Welch, W. J.: Interaction of the outflow and quiescent gas in Orion - HCO (+) aperture synthesis maps, Astrophys. J., Vol. 283 (1984) pp.655-667.
- 11) Kurono, Y., Morita, K-L, Kamazaki, T.: A Study of Combining Technique of Single-Dish and Interferometer Data: Imaging Simulations and Analysis, Publ. Astron. Soc. Japan, Vol.61 (2009) pp.873-894.