Vol.47 No.1 通信総合研究所季報 Mar. 2001
pp.47－57

研　　究

2.7 GALAXY－リアルタイム VLBI の天文観測ネットワーク

藤沢　健太[*1]　川口　則幸[*1]　小林　秀行[*1]　井口　聖[*1]
宮地　竹史[*1]　徂徠　和夫[*1]　近藤　哲朗[*2]　小山　泰弘[*2]
中島　潤一[*2]　関戸　衛[*2]　大崎　裕生[*2]　大久保　寛[*2]
木内　等[*3]　高橋　幸雄[*4]　金子　明弘[*5]　平林　久[*6]
村田　泰宏[*6]　魚瀬　尚郎[*7]　岩村　相哲[*7]　星野　隆資[*8]

2.7 GALAXY－Real-time VLBI for Radio Astronomy Observations

By

Kenta FUJISAWA, Noriyuki KAWAGUCHI, Hideyuki KOBAYASHI,
Satoru IGUCHI, Takeshi MIYAJI, Kazuo SORAI,
Tetsuro KONDO, Yasuhiro KOYAMA, Junichi NAKAJIMA,
Mamoru SEKIDO, Hiro OSAKI, Hiroshi OKUBO,
Hitoshi KIUCHI, Yukio TAKAHASHI, Akihiro KANEKO,
Hisashi HIRABAYASHI, Yasuhiro MURATA, Hisao UOSE,
Sotetsu IWAMURA, and Takashi HOSHINO

GALAXY is a research project on advanced VLBI technology, jointly conducted by CRL, NAO, and NTT. The testbed of the project is a 2.5-Gb/s ultra-high speed network using Asynchronous Transfer Mode (ATM). One of the aims of this project is to achieve high-sensitivity VLBI observation with this gigabit class network. GALAXY network consists of KSP and OLIVE networks provided by NTT and spans 200km range. The sensitivity achieved in our current observation system is comparable to the world-highest class (～10mJy) using conventional VLBI samplers. This short baseline and high-sensitivity make GALAXY a unique VLBI network for astronomy in the world. Here we describe the properties of GALAXY network and observations focusing on some unique results that can be achieved with the capability of GALAXY. Developments of new networking technology such as Internet Protocol (IP) with GALAXY network are also presented.

[キーワード] GALAXY, 実時間 VLBI, ATM ネットワーク
GALAXY, Real-time VLBI, ATM network

＊1 国立天文台
＊2 鹿島宇宙通信センター　通信総合研究所
＊3 第六研究チーム
＊4 企画部　企画課
＊5 標準計測部　周波数標準課
＊6 宇宙科学研究所
＊7 NTT 情報流通プラットフォーム研究所
＊8 NTT アドバンステクノロジ株式会社

1. はじめに

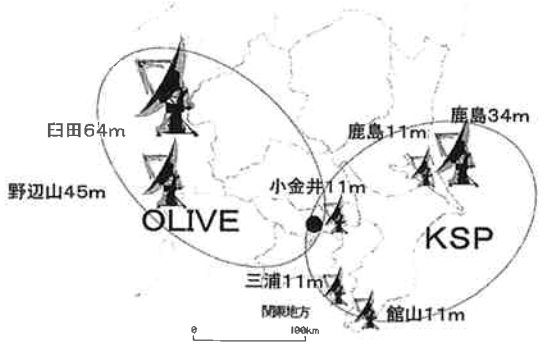
GALAXY とは，通信総合研究所の測地 VLBI ネットワーク KSP（Key Stone Project，吉野[1]）と，国立天文台および宇宙科学研究所が共同実験を行っている実験ネットワーク OLIVE（Optically LInked VLBI Experiment，川口[2]）を結合したものである（第1図）．それぞれのネットワークは日本電信電話株式会社（NTT）との共同研究によって光ファイバで結合されており，VLBI 観測データはデジタル光回線（ATM ネットワーク）によってリアルタイムで通総研小金井の KSP 相関器，あるいは天文台三鷹相関局まで伝送，処理される．

GALAXY では，観測帯域幅の拡大による高感度な天文 VLBI 観測を実現することを目標としている．VLBI における天体の検出感度は次の式で表される：

$$S_{lim} = 7 \cdot \frac{2k}{\eta_s} \sqrt{\frac{T_1 T_2}{\eta_1 A_1 \eta_2 A_2}} \frac{1}{\sqrt{2B\tau}} \quad \cdots\cdots(1)$$

ここで S_{lim} は検出可能な最小のフラックス密度，k はボルツマン定数，η_s はデジタル化・相関処理ロスなどのロス係数（0.5 程度），T_1，T_2 はアンテナ 1，2 のシステム雑音温度，η_1，η_2 はアンテナの開口能率，A_1，A_2 は物理的開口面積，B は観測帯域幅，τ は積分時間である．右辺の係数 7 は，フリンジサーチ窓内のノイズレベルに対し，7 倍以上のピークを相関検出とする，という判定基準である．この式から明らかなように，検出感度を上げる，すなわち S_{lim} を下げるためには，低システム雑音化，大口径化，積分時間の伸長，および観測帯域幅の広帯域化が必要である．

現在，一般的に行われている VLBI 観測では磁気記録装置がデータ取得の最終段として用いられている．1 ビットサンプリングの場合，サンプリングレート f_s に対する観測帯域幅 B は $B = f_s/2$[Hz] である．天体の検出限界となる最小フラックス密度 S_{lim} は $\sqrt{B}$ に反比例する．国内で広く用いられている VLBI レコーダ DIR1000 では最高記録速度は 256Mbps（メガビット毎秒）であり，したがって 1 ビットサンプリング時での観測帯域幅は 128MHz である．2 ビットサンプリングでは 64MHz の観測帯域幅となる．



第1図 GALAXY ネットワーク．KSP と OLIVE の接点に NTT 武蔵野研究所がある．

VLBI 観測感度を改善する方法の一つは，磁気記録装置の記録速度を高速化する方法である．既に通信総合研究所では世界に先駆けて 1Gbps（ギガビット毎秒）の記録速度を持つ磁気記録装置 GBR を開発し，VLBI 観測に応用を開始している（中島[3]）．

広帯域化のもう一つの方法は磁気記録装置を使わずに観測データを光ファイバ・ネットワークで伝送する方法である．昨今の，インターネットに代表される情報流通網の発展は著しく，ギガビット級の情報伝送速度が実現されている．情報流通網の基幹回線として ATM（非同期転送モード）ネットワークが広く使用されている．これらの光ファイバ・ネットワークを用いて VLBI データを伝送することにより，磁気テープの記録速度をはるかに超えた広帯域で高感度な観測を実現できる可能性がある．また現在の発展状況から推測される将来性も非常に大きい．

KSP に関する詳細な報告は，通信総合研究所英文論文集第 46 巻第 1 号にまとめられているので，ここでは省略する．国立天文台，宇宙科学研究所と NTT の共同で行われている OLIVE では，野辺山 45m アンテナ（天文台），臼田 64m アンテナ（宇宙研）および臼田 10m リンクアンテナでリンクした VLBI 観測衛星「はるか」によって実験を行っている．実験内容は「はるか」と地上アンテナでリアルタイム相関処理を実現するスペース OLIVE と，地上アンテナ間で超広帯域・高感度 VLBI 観測を実現する高感度 OLIVE の 2 本からなる．（平林[4]，川口[2]）

OLIVE 実験はリアルタイム VLBI 観測技術の実現などの工学的成果を生み出した（井口[5]）．しかし臼田－野辺山間は直線距離が 20km 程度と短いため 22GHz でもフリンジ間隔が 100 ミリ秒角以上であり，高感度観測が実現できても天文観測には不十分な分解能となる．

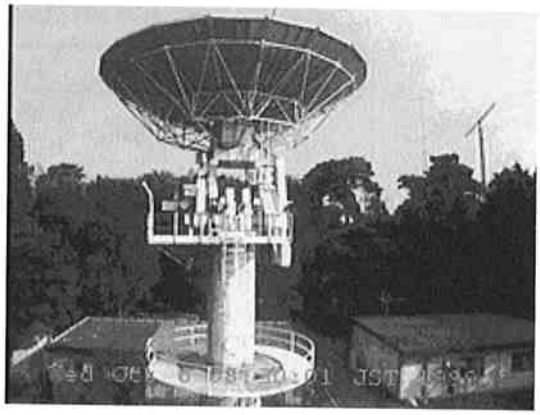
高感度で，しかも天文観測に十分な分解能のある観測ネットワークの構築を目指して GALAXY 実験が開始され，実際の観測が 1998 年 12 月から開始された．本論文では，次節で GALAXY ネットワークの概要，観測システムと実験観測の現状について，第 3 節では観測の結果得られた天文学的成果について述べる．第 4 節では GALAXY およびネットワークを利用した VLBI の発展の展望を述べ，最後にまとめとする．

2. GALAXY ネットワーク

2.1 GALAXY ネットワークの概要

GALAXY ネットワークに参加するアンテナを第 2 図

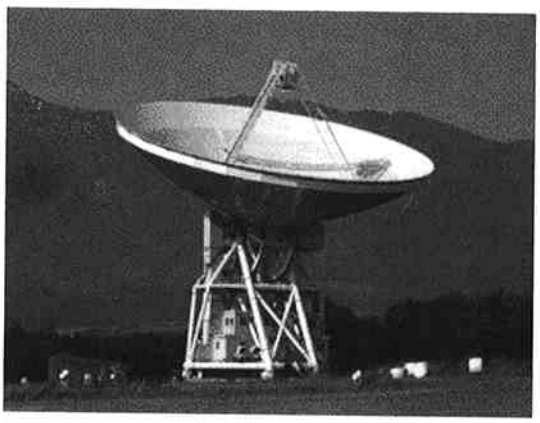
a 臼田 64m アンテナ



c 小金井 11m アンテナ

d 館山 11m アンテナ

b 鹿島 34m アンテナ



e 野辺山 45m アンテナ

第 2 図

a～e に，アンテナの諸元（アンテナ名，口径，開口能率，システム雑音温度（Tsys），システム等価フラックス密度（SEFD））を第 1 表に示す．野辺山 45m アンテナは受信可能周波数帯が 22GHz 以上であり，通常の GALAXY 観測には参加していない．鹿島 34m と鹿島 11m は同時に GALAXY に参加することはできない（ATM 送信装置が 1 台）ため，基本的には鹿島 34m が参加し，観測スケジュールの調整状況に応じて鹿島 11m が参加する．以下では通常の GALAXY 実験，すなわち臼田 64m，鹿島 34m，小金井 11m，館山 11m の 4 局で行われる観測に絞って述べる．

各観測局の地心座標を第 2 表に，アンテナ間の基線長を第 3 表に示す．基線長は最長の臼田 64m－鹿島 34m で約 208km である．現状の GALAXY では KSP ター

第1表 GALAXY参加アンテナの諸元

アンテナ名	口径	開口能率	Tsys[K]	SEFD[Jy]
臼 田	64m	0.53（Sバンド）	63	102
		0.25（Xバンド）	50	172
鹿島34	34m	0.60（Sバンド）	70	355
		0.60（Xバンド）	54	274
小金井	11m	0.81（Sバンド）	76	2725
		0.67（Xバンド）	95	4118
館 山	11m	0.79（Sバンド）	71	2610
		0.65（Xバンド）	103	4602
鹿島11	11m	0.80（Sバンド）	71	2578
		0.71（Xバンド）	99	4050
（野辺山）	45m	0.60（22 GHz）	150	478
		0.60（43 GHz）	150	478

※臼田はSまたはXのみの場合と，S／X同時観測の場合で開口能率・Tsysが変化する．上記の値はS／X同時観測の場合

第2表 アンテナの地心座標

アンテナ名	位置［km］		
	X	Y	Z
臼 田	3855.355	3427.428	3740.971
鹿島34	3997.649	3276.691	3724.279
小金井	3941.938	3368.151	3702.235
館 山	4000.984	3375.276	3632.213
鹿島11	3997.506	3276.878	3724.241
（野辺山）	3871.024	3428.107	3724.040

第3表 各アンテナ間の基線長［km］

	臼 田	鹿島34	小金井	館 山	鹿島11	（野辺山）
臼 田	−	208.0	111.9	189.1	207.7	23.1
鹿島34	208.0	−	109.3	134.9	0.2	197.4
小金井	111.9	109.3	−	91.9	109.1	95.4
館 山	189.1	134.9	91.9	−	134.8	167.7
鹿島11	207.7	0.2	109.1	134.8	−	197.1
（野辺山）	23.1	197.4	95.4	167.7	197.1	−

ミナルを用いた観測モードによって観測を行っている．観測周波数帯はS／X（2/8GHz）帯で，同時観測を行う．各チャネルのビデオ帯帯域幅は8MHz，チャネル数は16チャネル，サンプリングは1ビットで行う．Xバンド信号を1〜10チャネル，Sバンド信号を11〜16チャネルに分配して同時観測を行う．参加局数は最大で4局である．基線毎の検出感度を第4表，観測周波数を第5表に示す．

GALAXY観測局はATMネットワークで結合されている．ネットワークはSTM-16であり，回線容量は2.5Gbpsである．各観測局にはATM送信端局装置と呼ばれるVLBI−ATMインターフェイスが設置され，サンプラ出力の256MbpsデータをATMセル化し回線へ伝送する．現在はKSP観測システムを流用しているため，KSPシステムに合わせて設計された端局装置の最高データ速度は256Mbpsである．KSPにおけるVLBI観測システムとATMネットワークの関係については木内[6][7][8]に詳細が述べられている．臼田および野辺山のATMインターフェイスも同様のシステムである．

各観測局の観測データはNTT武蔵野研究所へ伝送さ

第4表 基線毎の検出感度［mJy］（上段：S，下段：X）

	臼 田	鹿島34	小金井	館 山	鹿島11
臼 田	—	11 8	31 31	30 33	30 31
鹿島34	11 8	—	57 39	56 41	56 39
小金井	31 31	57 39	—	156 161	155 151
館 山	30 33	56 41	156 161	—	151 159
鹿島11	30 31	56 39	155 151	151 159	—

Sバンド帯域幅＝32MHz，Xバンド帯域幅＝80MHz(X)，積分時間＝900sec，ロス係数＝0.5，7σ検出限界

第5表 通常のGALAXY観測における周波数設定

バンド	チャンネル	ベーズバンド周波数
Xバンド	1	8284.99
	2	8294.99
	3	8304.99
	4	8324.99
	5	8354.99
	6	8414.99
	7	8444.99
	8	8464.99
	9	8474.99
	10	8484.99
Sバンド	11	2269.99
	12	2279.99
	13	2289.99
	14	2299.99
	15*	2309.99
	16*	2319.99

＊チャンネル15と16は，臼田では観測していないため，Sバンドの実質的な帯域幅は32MHzである

れ，クロスコネクト装置あるいはATMスイッチを通して小金井のKSP相関器へ伝送される．小金井では受信端局装置によってATMセルとして伝送されてきたデータをVLBIデータへ変換する．送信・受信端局装置により，VLBI観測にとってネットワークが透明となり，KSP相関器は通常の磁気記録信号の再生と同様に相関処理を行うことができる．相関処理では相互相関処理とバンド幅合成の処理まで行われる．測地観測と異なり，天文観測では相関振幅と相関位相が観測量となる．現在のGALAXYでは画像観測を行わないため位相情報は使っていない．したがってバンド幅合成した後の相関振幅が観測結果となる．

2.2 GALAXYの特徴

天文観測VLBIネットワークとしてのGALAXYには，高感度，短基線，リアルタイムという3つの特長がある．臼田64m，鹿島34mという世界的にも大型のアンテナを有するネットワークであり，現状の観測システムにおいて天体の検出感度は10［mJy］程度と世界最高クラスである（1Jy(ジャンスキー)$=10^{-26}$[W/m^{2}Hz]）．現在最大の天文VLBI観測ネットワークVLBA（米国国立電波天文台，National Radio Astronomy Observatory）の検出感度とフリンジ間隔は，Sバンドで14[mJy]・3[mas]，Xバンドで14[mJy]・0.9[mas]である．（1［mas］=1/1000［arc sec］）

GALAXYが短基線であることは，一般的に高分解能が特徴の世界のVLBIネットワークと比較して特殊な地位を占めることができることを意味する．フリンジ間隔はXバンドで約35[mas]であり，VLBAなどのネットワークでは分解されて相関フラックスが低下し検出できない，10［mas］程度に広がった天体に対して感度がある．このような比較には，天体の輝度を温度に換算した輝度温度$(T_B)_{lim}$が便利である．黒体放射の場合，輝度温度は物理的な温度と一致するため，天体物理的なパラメータとしても重要である．一基線での検出可能な最小フラックス密度S_{lim}および基線長Dによって，検出可能な最低の輝度温度$(T_B)_{lim}$は次の式で表される：

$$(T_B)_{lim} \cong \frac{2}{\pi k} D^2 S_{lim} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

現状のGALAXYでは鹿島34－臼田64mで最も輝度温度に対する検出感度が高く，約2×10^5[K]である．典型的なVLBIネットワークの輝度温度検出感度が10^7[K]

程度であることと比較すると，きわめて低い輝度温度の天体の検出に強力なネットワークであることがわかる．

リアルタイム性とは，観測を行っている最中に結果を確認でき，観測へとフィードバックすることができることである．磁気記録装置を用いたVLBI観測では全く不可能なことであり，特に短時間で強度が変動する天体の観測において大きな意味を持つ．

世界の天文VLBIネットワークは高分解能画像観測を行うことを目的としている．GALAXYは画像観測能力は低いため，低輝度温度天体の検出，野心的な観測に重点を置いている．

2.3 実験観測

KSPとOLIVEを結合したGALAXYの実験は，1998年12月9日に初めて成功した．その後，1999年には23回，2000年には6回の観測が行われている．1回の観測は5～7時間で，典型的な観測天体数は10天体である．観測の目的に応じて1天体を2～3回観測することもある．

3. 天文観測における成果

GALAXY実験観測によって得られた天文学的成果の例を以下に紹介する．

3.1 オリオン電波源12番

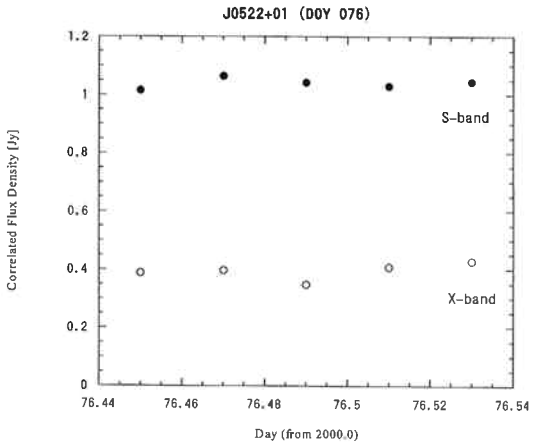
オリオン座大星雲（M42）は，中心部に存在する若い恒星の紫外線で電離された電離領域（HII領域）であり，熱的電波の卓越する強力な電波源である．オリオン座大星雲中心部3分角の範囲に，見かけのサイズが1秒角を下回るコンパクトな電波源が20以上も発見されている（Felli[9]）．その大部分はθ^1C Ori等の若い恒星に照らされた電離ガスの凝縮した部分であり，放射は熱的なものと考えられている．しかし電波源12番と呼ばれる天体は，2～90[mJy]と40倍以上もの大きな強度変動を示すこと，大陸間VLBIによって検出され，サイズが>1.3[mas]$=0.6$AU（天文単位）と非常にコンパクトであることがわかっている．輝度温度は$T_B \lesssim 5.2 \times 10^8$[K]という高温であり，非熱的放射の卓越した天体である．光学的にはトラペジウムの最も西側の星θ^1C Oriに対応し，B0.5とT Tauriの連星（Bossi[10]）であることが知られている．また電波源12番の強度変動は，連星の軌道相互作用が関与している可能性が指摘されている．

オリオン電波源12番についてこれまで観測された強度変動は，10日程度で10倍の変動といった長い時間スケールであった．しかし天体サイズが1AU＝10光分程度であることを考えると，HR1099に見られるような時間スケール1時間程度の強度変動がある可能性がある．このような短時間強度変動は電波放射領域の物理状態を反映するので，存在するかどうかだけでも興味深い．

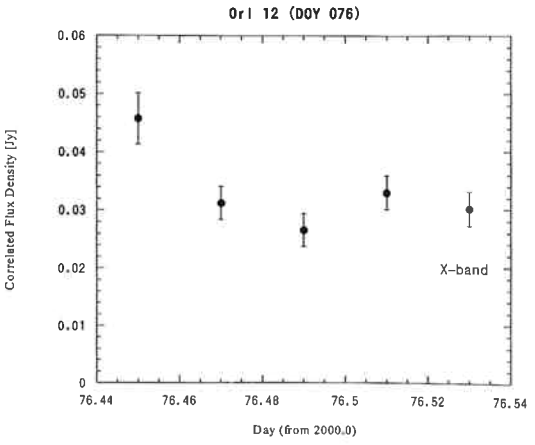
我々はGALAXYによってオリオン電波源12番の観測を行った．観測は通常のGALAXYのモードで行われた．観測日は2000年3月16日（DOY076），および2000年3月21日（DOY081）である．システム起因の変動を避けるため，構造が分解されない程度に小さい参照天体（J0522＋01，0528＋134）とオリオン電波源12番を交互に観測した．積分時間はオリオン電波源12番が900秒，参照天体がそれぞれ300秒である．観測時間は10:50－12:40（UT）で，この間に5回のスキャンを行った．

参照天体の観測結果を第3図に示す．J0522＋01の観測では，Sバンドのフラックスは1.04±0.02[Jy]，Xバンドでは0.40±0.03[Jy]となった．この天体は1日程度の時間スケールで強度変動を起こさないことが知られており，観測された変動は観測システムに起因するものである．その変動はSバンドで2%，Xバンドで7%以下であり，観測時間中のシステムはこの程度の観測再現性を実現できる安定性を有していた．もう一つの参照天体，0528＋134の観測でも同様の結論が得られている．

目標天体オリオン電波源12番の観測では，DOY076



第3図　参照電波源J0522＋01の強度変動



第4図　観測天体オリオン電波源12番の強度変動

ではXバンドで電波を検出し，また変動も検出した（第4図）．Sバンドでは非検出（$<7\sigma$）であった．DOY081ではS／Xともに非検出であった．Sバンドではオリオン座大星雲による背景放射が強く，特に臼田ではシステム雑音温度が約4倍に上昇したため，7σの検出感度が約30[mJy]と悪くなっている．以下では，強度変動を検出したDOY076でのXバンド観測結果について述べる．

得られた相関フラックス密度は，観測開始時には26[mJy]であったが，26分後には16[mJy]に低下した．その後は観測時間中，約15[mJy]で一定していた．強度の時間変動から天体サイズを推定する．天体を光が横断するのに要する時間（横断時間）は強度変動の時間スケールより必ず小さいと考えられる．変動時間スケール$\tau=1500$秒から，$c\tau=4.5\times10^8$[km]$=3$[AU]$=6.5$[mas]を得た（cは光速）．したがって強度変動から得られた天体サイズは6.5[mas]以下である．VLBIによる直接観測（>1.3[mas]）と比較すると，天体サイズθ_sは$1.3<\theta_s<6.5$[mas]の範囲であるといえる．

強度変動は26分間に22.9→15.6[mJy]（68%＝2/3）に低下であった．時間変動から得られた天体サイズが直接観測のわずか5倍であったこと，全フラックスに匹敵する変化量が存在したことは，放射領域の運動速度が光速に匹敵するか，あるいは天体全体でいっせいに強度変動をするような放射状態の激しい変動が存在することを意味している．

また，シンクロトロンロスでは1500秒の時間スケールを説明できない．したがって光速に匹敵する速い（おそらく膨張）運動が存在することが考えられる．これはX線観測でも示されているT Tauri型星の表面での活動性と関係があるものと考えられる．

連星の周期はP＝65.4325日である．過去の観測では連星の位相$\Phi=0.15$で電波強度最大となり，それ以後は活動性が低い状態になる傾向が指摘されていた．しかし，我々の観測は$\Phi=0.5$で行われたにもかかわらず，20[mJy]を超えるフラックスと変動をとらえた．したがって連星の位相と活動性の関係について，否定的な結果を得た．

今回の観測ではGALAXYの高感度特性を活かして1時間以下という短い時間スケールでの強度変動をとらえることに成功した．今後さらに観測回数を重ねてより確実な結果を得るとともに，Sバンドでの検出もこころみる．S／Xバンドで観測に成功すれば，スペクトル指数の変動からより天体物理的に重要な結果が得られることであろう．

なお，構造を分解できないのにVLBI観測が有利である点は以下の通りである：オリオン領域は背景のHII領域が強い電波源であり，数十mJyの弱い天体を単一鏡で観測することはできない．逆に，世界の高感度VLBI望遠鏡での観測では，天体構造を分解してしまう．したがってGALAXYの高感度・低分解能VLBI観測がこの天体の観測に最適である．

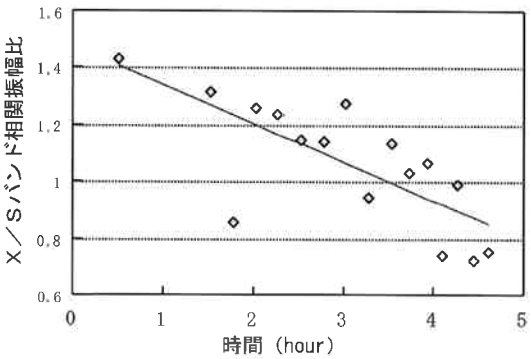
3.2 HR1099

HR1099（V711 Tau）は距離36pc（パーセク，1pc＝3.26光年），可視光度5.9等級，RS CVn型の，激しい活動性を示す近接連星である．連星はG5IVとKIVから成り，軌道周期は2.837日，見かけの軌道半径は1.48masである．強い電波放射する連星であることが知られており，Xバンドでの電波強度は10〜300 mJy程度まで変動し，変動の時間スケールも数時間と短い．通常Xバンドでは30mJy程度の平静（Quiescent）状態にあるが，しばしばフレア（flare）と呼ばれる強い放射状態となる事が知られている．光学観測では連星の公転に伴う周期的強度変動が観測されているが，電波の強度変動における周期性は現在のところ確認されておらず，強度変動の全容も明らかではない．フレアの物理的な機構も，理論的提案はあるものの，解明されているとは言えない．

GALAXYでは高感度という特徴を活かして平静状態での電波強度及びスペクトルを観測すること，フレアでの強度とスペクトルの変動を観測して放射の物理状態に制限を与えることを目的としている．

GALAXYによるHR1099の観測は継続的に行われている．これまでにフレアを2回検出している．天文学的な成果は別途報告される（川口 in preparation）ので，ここではGALAXYのリアルタイム性が発揮された1999年6月8日の観測について述べる．

この日にはHR1099以外にも複数の観測が予定されていたが，フレアのその後の変化を観測するために，観測中に観測スケジュールを変更し，その日の観測時間の最後まで連続5時間にわたってHR1099の観測を継続した．その結果，最初はXバンドで非常に強い電波を出していたが，Xバンドでの電波強度は ほぼ直線的に低下を続け，一方，Sバンドの電波強度は時間とともに



第5図 相関振幅比の時間変化

あまり大きな変化を示さないことが明らかにされた．第5図は，横軸に時間，縦軸に S／X の相関振幅比（スペクトル指数に対応する）をとってプロットしたものである．時間とともに，直線的に相関振幅比が小さくなっていく様子が明らかであり，X バンドで急激な放射強度の低下があったことを示している．

この観測では，GALAXYのリアルタイム性という特長が発揮され，HR1099 がフレアしていることを観測中に発見できた．通常の VLBI 観測では，観測中は磁気テープにデータを記録するだけなので，天体で何が起きているのか全くわからない．しかし GALAXY の場合は 観測中に相関処理結果が得られるため，ある程度は天体がどのような状態にあるのか判断できる．今回の観測を普通の磁気テープで行っていたら，数日後に相関処理を行ってようやくフレアを発見することとなり，スケジュール変更は不可能である．

3.3 未知の天体の探査

GALAXY は世界最高級の検出感度と機動性が特長である．この特長を活かして未知天体発見の研究も行われている．これまで VLBI 観測されたことがない天体，または VLBI 観測で検出できるとは考えられていない天体の検出を目指した観測である．あるいは，性質のよくわかっていない電波源を VLBI 観測し，コンパクトで高温な天体を発見することを目指している．これは天文学に新たな一分野をひらく事を目指した野心的な研究でもある．これまでに対象とした天体はガンマ線バースト天体，球状星団中の電波源，通常銀河の中心部，HII 域，惑星状星雲などである．現在の段階では確固とした結果は得られていないが，より高感度な観測システムを構築することで大きな発見ができるものと考えている．

4. 今後の展望

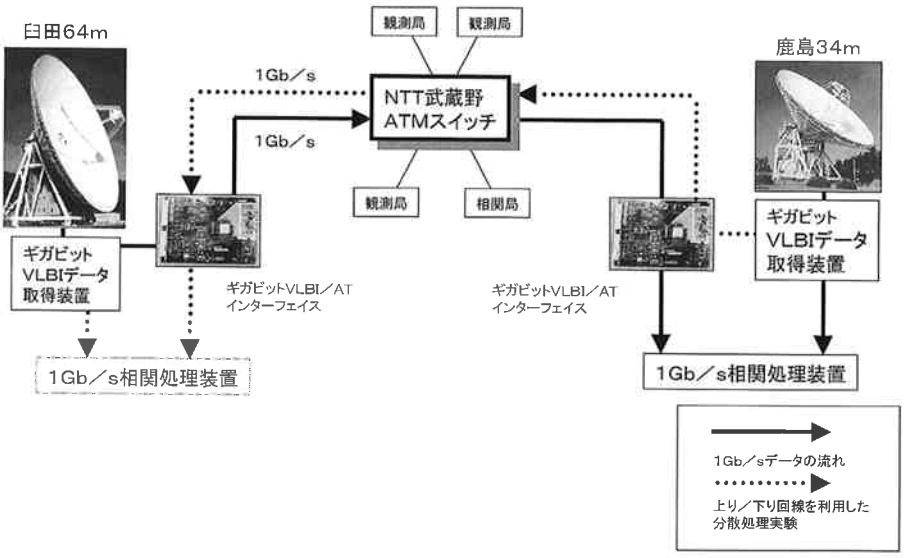
現在の GALAXY はサンプラ・相関器に既存の装置を流用しているため，広帯域化による高感度化はまだ実現できていない．目標とする 2Gbps 観測へ向けて観測システムの広帯域化を行う研究開発を行っている．一方，GALAXY ネットワークを電波望遠鏡を高速ネットワークで結合した技術開発実験用テストベッドとして，将来の観測システムについて研究している．

4.1 1/2Gbps 観測による超高感度 VLBI の実現

現在行われている GALAXY の実験観測は 256Mbps の KSP モードである．回線容量を十分に使ったデータ速度，すなわち 2Gbps での観測を 2001 年に実現するよう研究を進めている（第6図）．

2Gbps での観測が実現し，さらに臼田 64m アンテナの観測方式を X バンドに特化すると，検出感度は 1 [mJy]のレベルに到達する（第6表）．また輝度温度の検出感度も約 2.7×10^4[K]となる．これは世界の VLBI ネットワークと比較して最高の検出感度となる．検出感度の向上はこれまで観測不可能であった天体の観測を可能とし，特に過去に VLBI 観測例のない天体の観測は，天文学研究の突破口となる可能性を秘めている．その目標の一つが熱的天体の VLBI 観測である．熱的天体は恒星及び HII 領域に代表され，典型的な温度が 10^4[K]である．輝度温度の検出感度が 10^4[K]に達すると，これまでは全く不可能であった熱的天体の VLBI 観測に成功する可能性があることを意味する．

熱的天体の観測対象として重要となるのは恒星である．HR1099 等のフレア星を別にすると恒星の電波は通常非常に弱く，1[mJy]程度で検出されたものが数天体あるに過ぎない．しかし VLBI の角分解能で恒星の電波放



第6図 ギガビットクラスのデータ伝送実験ネットワーク

第6表 2Gbps観測時に予想される基線毎の検出感度（上段：Xバンド検出感度 [mJy]，下段：輝度温度検出感度 [K]）

	臼田	鹿島34	小金井	館山	鹿島11
臼田	—	1.3 2.7×10^4	5.2 3.0×10^4	5.5 9.0×10^4	5.1 1.0×10^5
鹿島34	1.3 2.7×10^4	—	11 6.1×10^4	12 9.8×10^4	11 0.2
小金井	5.2 3.0×10^4	11 6.1×10^4	—	45 1.77×10^5	42 2.34×10^5
館山	5.5 9.0×10^4	12 9.8×10^4	45 1.77×10^5	—	45 3.77×10^5
鹿島11	5.1 1.0×10^5	11 0.2	42 2.34×10^5	45 3.77×10^5	—

Xバンド帯域幅＝1GHz、積分時間＝900sec，ロス係数＝0.5，7σ検出限界（臼田はXバンドのみの観測の場合、システム雑音温度＝35K，開口能率＝0.5，SEFD＝60Jyとなる）

射領域であると考えられるコロナ，すなわち恒星の外層大気を直接観ることができれば，恒星の大気の研究にとって大きな影響を及ぼすこととなるだろう．GALAXYでは画像能力が低いため，まず天体のサイズを観測することから始める．例えばベテルギウス（αOri）は光学干渉計によって光球部分の画像が得られた唯一の恒星（太陽を除く）であるが，その外層大気の状態は吸収線の構造から推測されているに過ぎない．電波観測によって高温コロナがどの程度の範囲へ広がっているのか観測できれば，恒星から流出するガスの状態に制限が与えられ，超巨星から惑星状星雲への進化の研究に役立つと考えられる．

4.2 将来のネットワーク観測に向けた基礎研究

4.2.1 IP伝送方式の研究

現在のGALAXYではATMがネットワークの伝送方式として用いられている．しかし昨今のインターネットの爆発的な普及にともない，データ伝送方式ではIPが主流となりつつある．GALAXYでもデータ伝送をIP化する研究を行っている．

4.2.2 分散処理方式の研究

相関処理は現在の集中型相関器を用いる方法と，小型で機能を限定した相関器を多数使用した分散相関処理の方式が考えられる．集中型の場合，相関器入力部でネットワークがボトルネックになる可能性がある．ネットワークに対して親和性が高いのは分散相関処理である．2001年に計画している2Gbpsの観測では，ごく簡単ながらも分散相関処理の一つと見なせる．

4.2.3 ネットワークの地理的展開

GALAXYの実験は首都圏の大型アンテナを結合したものである．GALAXYで得られた技術的実績を，現在国立天文台が建設中のVERA観測局（水沢（岩手），入来（鹿児島），父島（小笠原），石垣（沖縄））に応用することが検討されている．VERAは2ビーム方式による位相補償VLBIであり，大気のゆらぎを克服した長時間積分による天体の観測が可能である．VERAを光ファイバ・ネットワークで結合すると，観測感度にかかわるτとBの二つのパラメータについて改善ができる．これはVERAの観測にとっても大きな意味を持つことになろう．

またネットワーク型VLBIに特徴的なこととして，磁気テープを使わないため観測が非常に簡便になるという点がある．観測が簡便に行えるということは観測の生産性が向上することを意味し，VLBI観測全体へよい方向のフィードバックを与えることになるだろう．さらにはリアルタイムイメージングといった観測も可能になるかも知れない．

こうして日本のアンテナがネットワークで結合されれば，必然的に海外の観測局もネットワークを利用したVLBI観測へと進んでゆくこととなるだろう．

5. ま と め

GALAXYはKSPとOLIVEという，関東甲信エリアで行われているVLBI観測網を結合したリアルタイムVLBIネットワークであり，実験は1998年12月から開始されている．観測データはATMネットワークによって相関局へ実時間で伝送・処理される．GALAXYは高感度，短基線，リアルタイムという3つの特長がある．臼田64m，鹿島34mという世界的にも大型のアンテナを有し，256Mbpsのデータ速度で約10[mJy]，磁気記録では不可能な2Gbps観測を実現すると，1[mJy]レベルの検出感度を達成できる．短基線であるため低い輝度温度の天体観測に有利であり，熱的天

体の VLBI 観測を実現する可能性を持っている．これらの特長を活かした天文学観測を行い，強度変動する天体の観測や未知の天体観測で成果をあげている．また，デジタルデータ伝送方式を採用したVLBI観測ネットワークは世界で唯一のものであり，将来の VLBI 観測方式の基礎となる技術開発研究を行っている．

謝　辞

GALAXY 実験は通信総合研究所，国立天文台，日本電信電話株式会社，エヌティティコミュニケーションズ株式会社，エヌティティアドバンステクノロジー株式会社から参加されている多くの方によって実現したものです．関係者の皆様に感謝いたします．

参 考 文 献

(1) Taizoh Yoshino, "Overview of the Key Stone Project", Journal of the Communication Research Laboratory, 46, 1, pp.3-6, March 1999.

(2) 川口則幸，亀野誠二，宮地竹史，"光結合型電波干渉計の研究－2"，通信・放送機構　平成12年度研究発表会予稿集，pp.163-166，平成12年6月．

(3) 中島潤一　GBR
http://www2.crl.go.jp/ka/radioastro/RandD/RandD-GBR.html.

(4) 平林久，小林秀行，村田泰宏，"光結合型電波干渉計の研究－1"，通信・放送機構　平成12年度研究発表会予稿集，pp.159-162，平成12年6月．

(5) Satoru Iguchi, Ph. D Thesis, University of Electro-Communication, March 2000.

(6) Hitoshi Kiuchi, Tetsuro Kondo, Mamoru Sekido, Yasuhiro Koyama, Michito Imae, Takashi Hoshino, and Hisao Uose, "Real-Time VLBI Data Transfer and Correlation System", Journal of the Communication Research Laboratory, 46, 1, pp.83-89, March 1999.

(7) Kiuchi Hitoshi, Takahashi Yukio, Kaneko Akihiro, Amagai Jun, Yoshino Taizoh, Kawaguchi Noriyuki, Kobayashi Hideyuki, Fujisawa Kenta, Uose Hisao, Iwamura, Sotetsu, Hoshino Takashi, Nakajima Junichi, Kondo Tetsuro, "Very long baseline connected interferometry via the ATM network", Proc. SPIE, Vol. 4011, pp.180-185, Jun 2000.

(8) Kiuchi H., Kaneko A., Takahashi Y., Kawaguchi N., Kobayashi H., Fujisawa K., Nakajima J., Kondo T., Uose H., Iwamura S., Hoshino T., Iguchi S., Amagai J., Yoshino T., "Very Long Baseline Connected Interferometry via the 2.4-Gbps ATM Network", Astrophysical Phenomena Revealed by Space VLBI, Proceedings of the VSOP Symposium, held at the Institute of Space and astronautical Science, Sagamihara, Kanagawa, Japan, January 19-21, 2000, Eds.: H. Hirabayashi, P.G. Edwards, and D.W. Murphy, Published by the Institute of Space and Astronautical Science, pp.293-296, April 2000.

(9) Felli M., Taylor G. B., Catarzi M., Churchwell E., Kurtz S., "The Orion Radio Zoo Revisited-Source Variability", ASTRON. AND ASTROPHYS. SUPPL. V.101, NO.1 pp.127-151, Octber 1993.

(10) Bossi M., Gaspani A., Scardia M., Tadini M., "Orionis A-A pre-main sequence low Q binary system?", Astronomy and Astrophysics, vol.222, no.1-2, pp.117-120, September 1989.