

e-VLBIおよび汎用科学インター フェースの研究開発

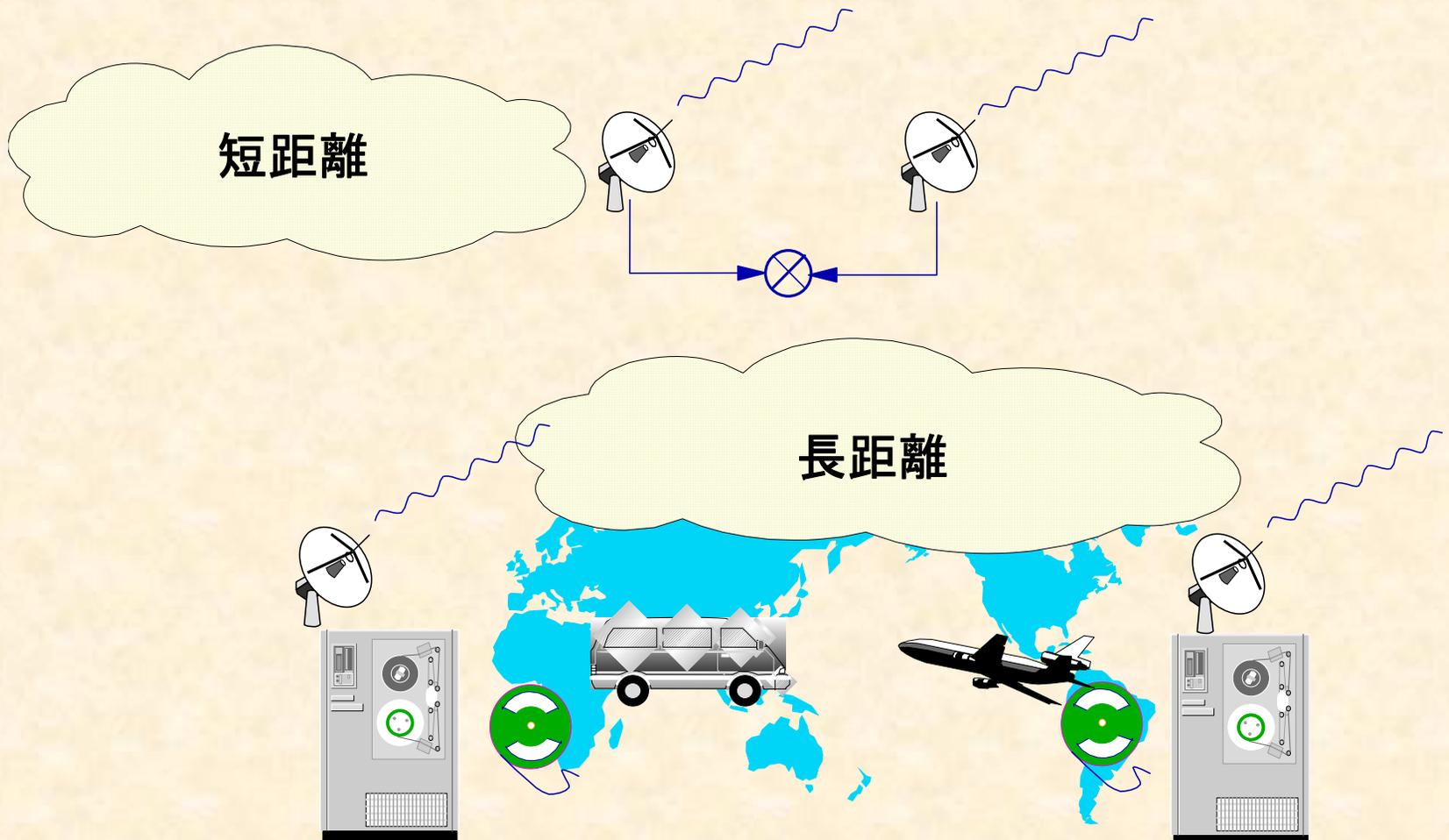
独立行政法人 情報通信研究機構
鹿島宇宙通信研究センター 小山泰弘

Contents

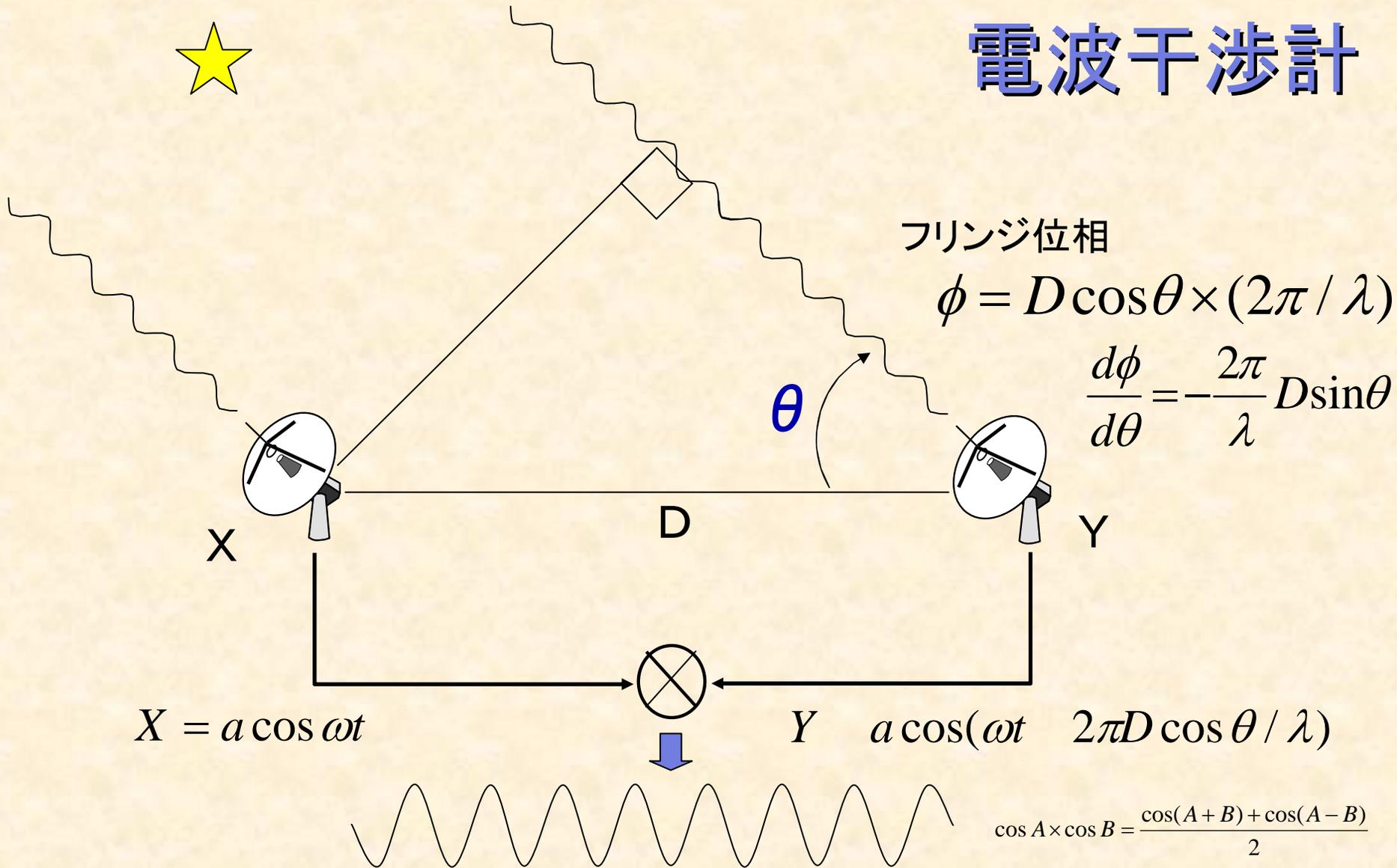
- ◆ VLBI と e-VLBI の概要
- ◆ 国際 VLBI 事業
- ◆ 汎用科学インターフェースの開発
- ◆ まとめ

VLBI とは. . .

- ◆ Very Long Baseline Interferometry : 超長基線電波干涉法
- ◆ Very Long Baseline Interferometer : 超長基線電波干涉計



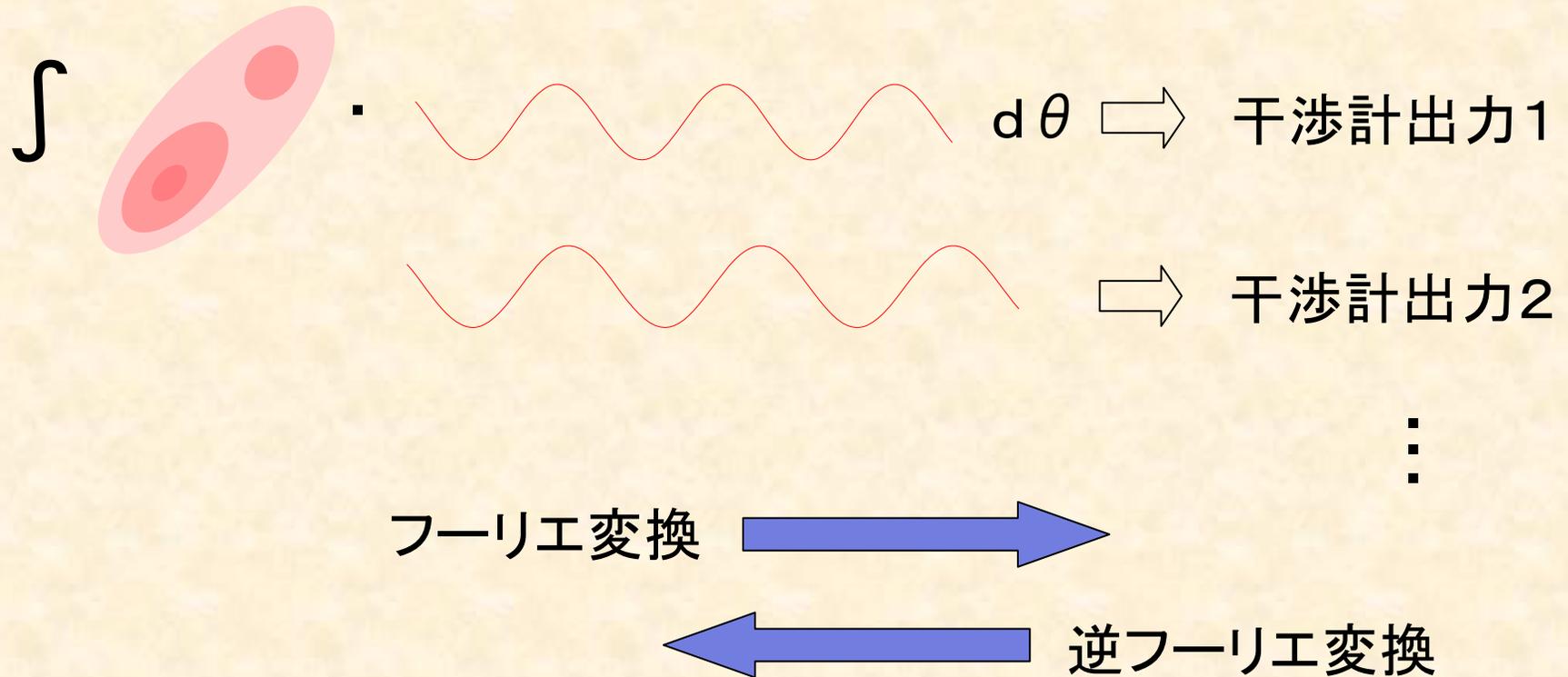
電波干渉計



かけ算出力
(LPF出力)

$$XY = \frac{1}{2} a^2 \cos(2\pi D \cos \theta / \lambda)$$

電波源強度分布と干渉計出力

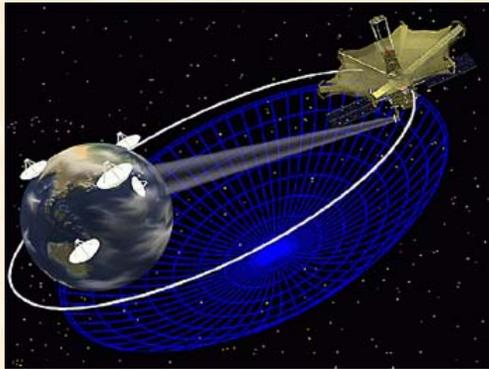


角度分解能 $\sim \lambda / D \Rightarrow 1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-5}$ arcsec (角度秒)

参考: ハッブル望遠鏡 0.05 arcsec、すばる望遠鏡 0.2 arcsec

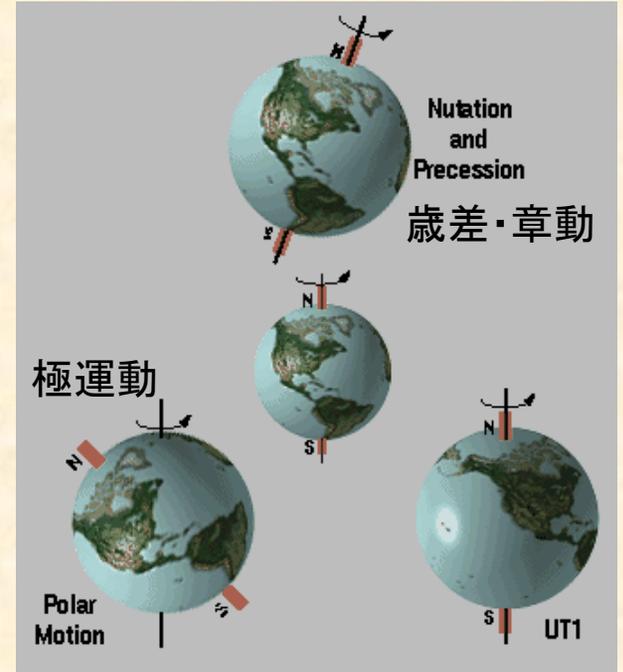
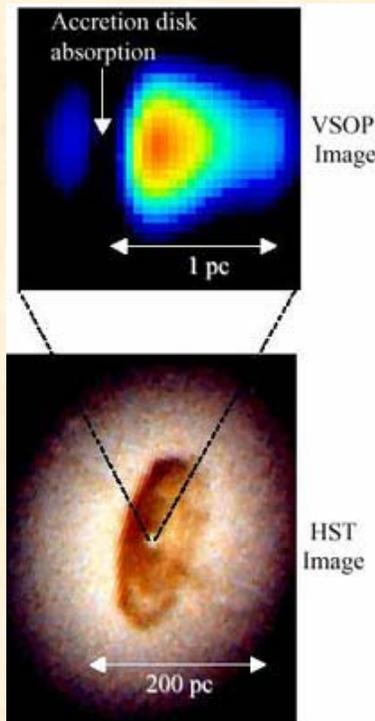
VLBI の応用分野

- ◆ 電波天文
 - 高解像度電波写真、天体のダイナミクス
- ◆ 測地
 - Plate Tectonics、基準座標系、地球回転

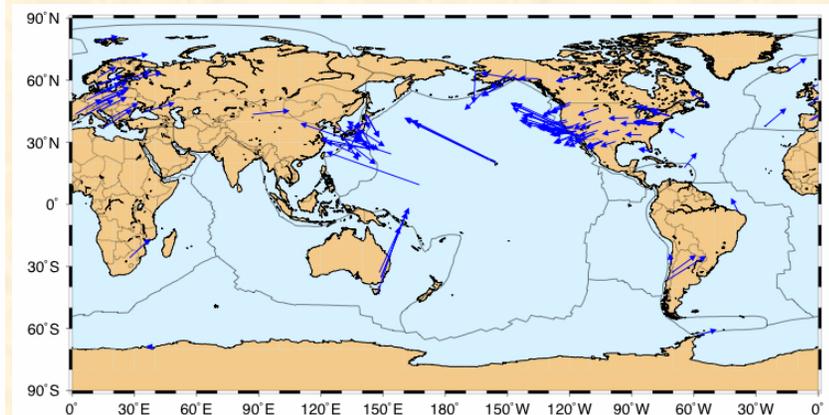


電波天文衛星『はるか』
による VLBI 観測例

NGC4261



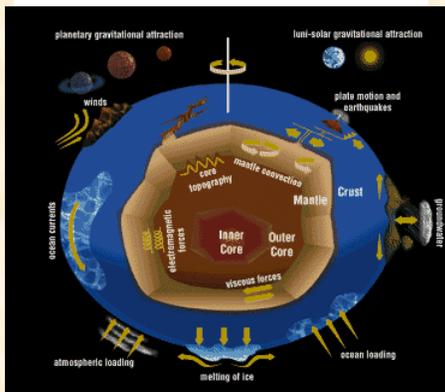
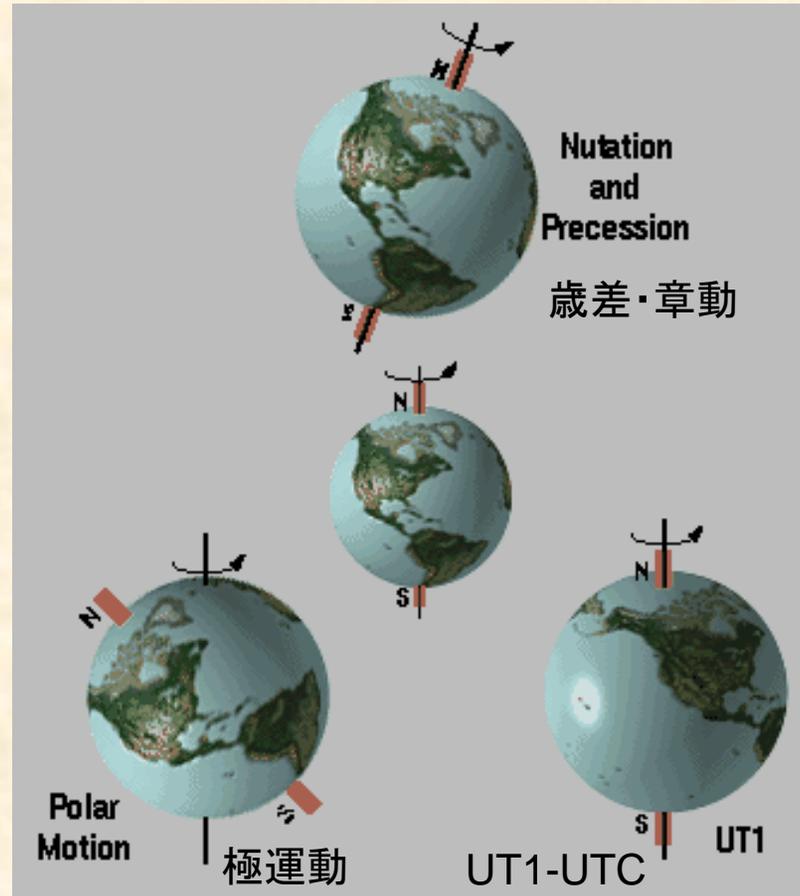
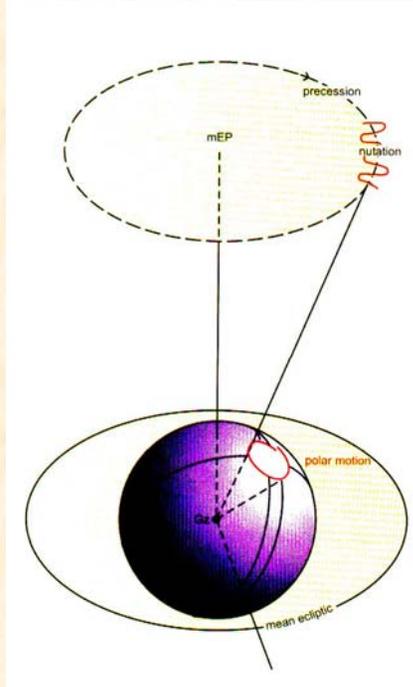
地球回転



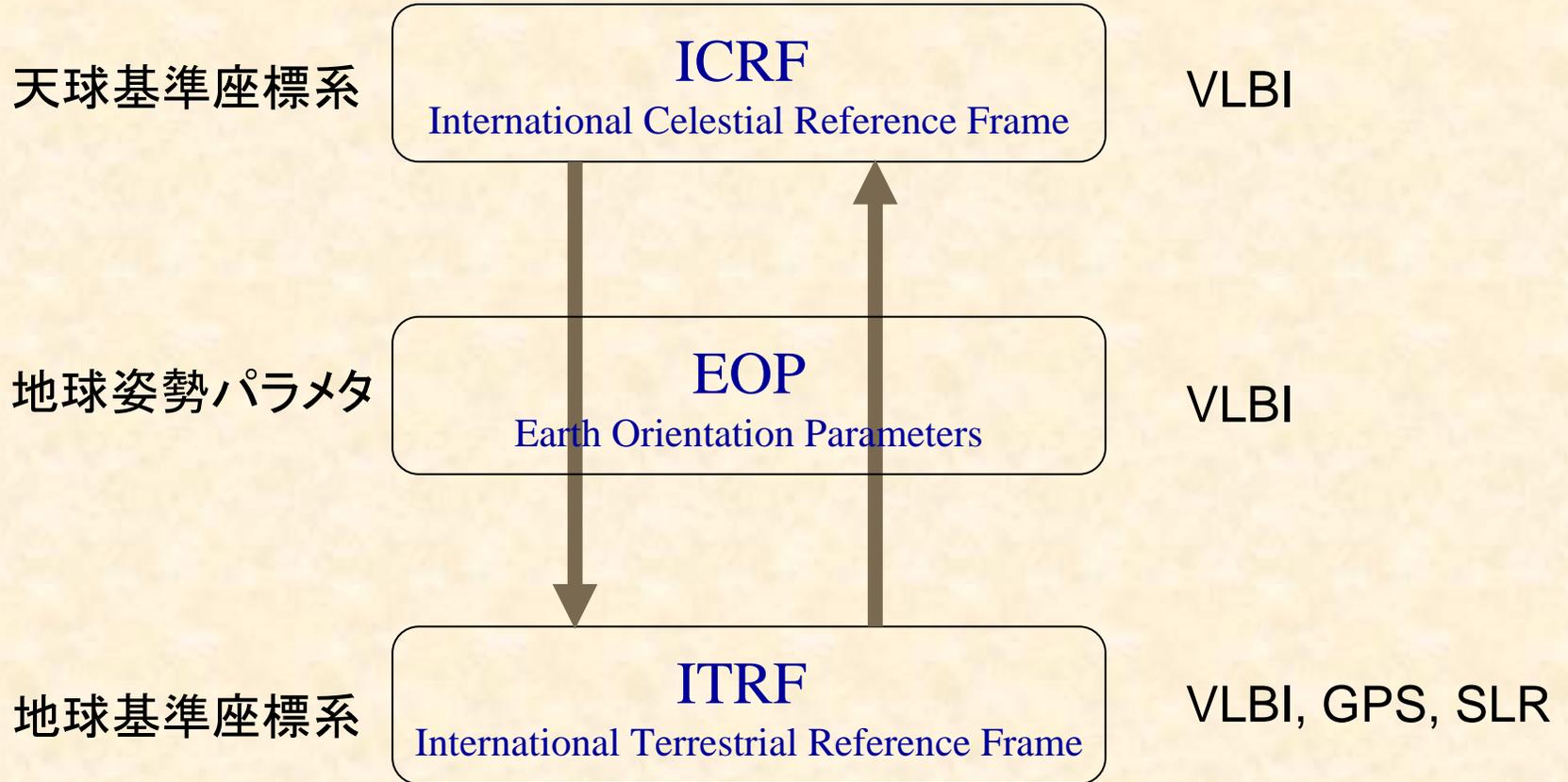
プレートテクトニクス

地球姿勢パラメタ／地球回転パラメタ

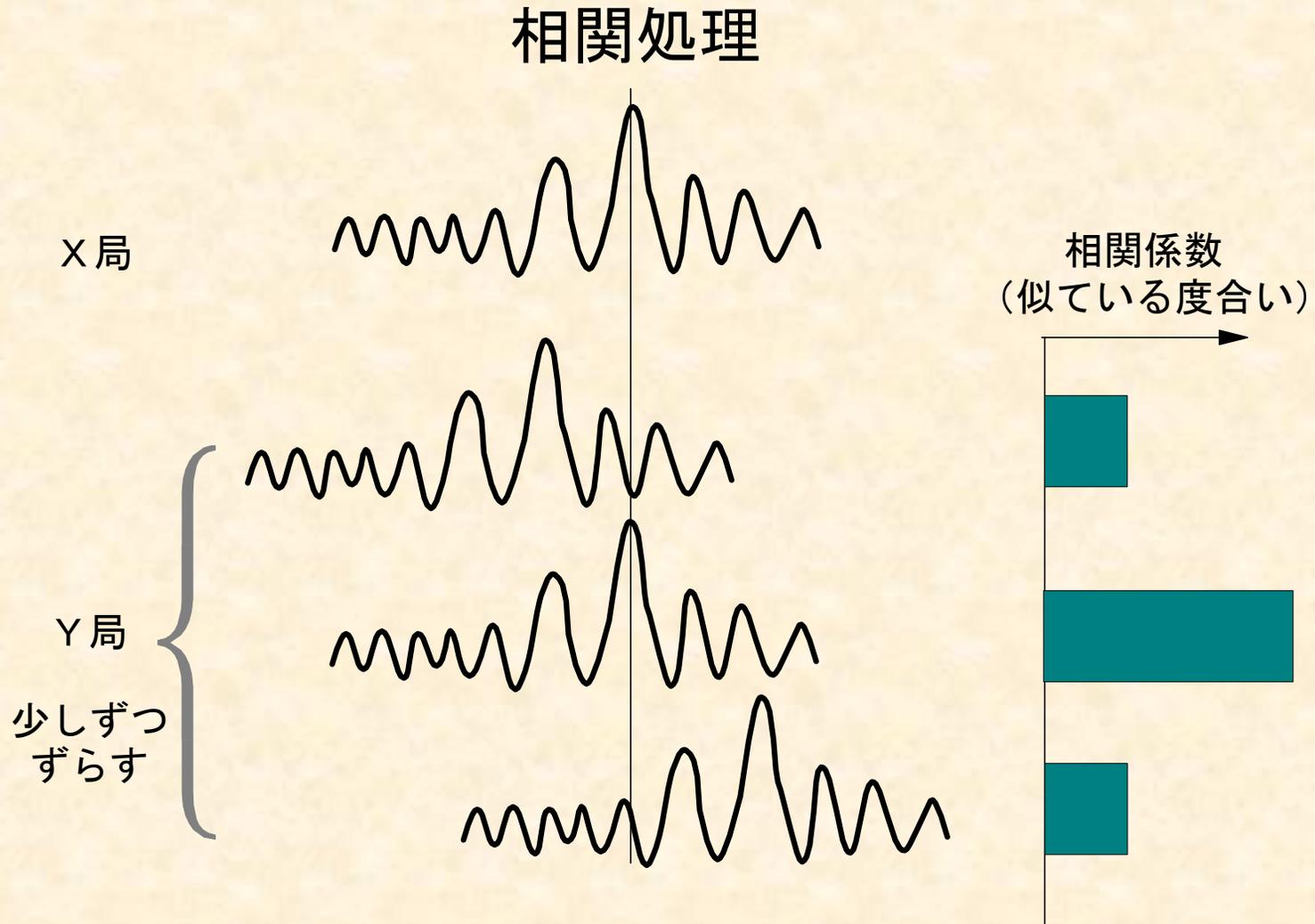
Earth Orientation Parameter / Earth Rotation Parameter



基準座標系と地球姿勢パラメータ



点状電波源の相互相関関数



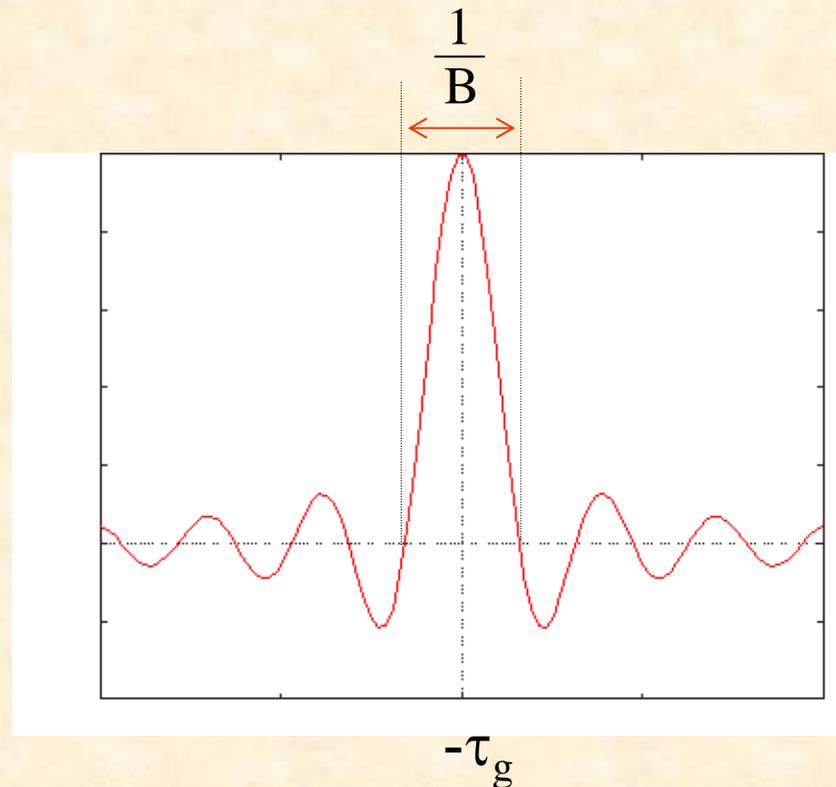
点状電波源の相互相関関数

$$c_{xy}(\tau) = 2\sqrt{T_{ax}T_{ay}} \int_{f_0}^{f_0+B} e^{i2\pi f(\tau + \tau_g)} df$$

$$2B\sqrt{T_{ax}T_{ay}} \cos\{(2\pi f_0 + \pi B)(\tau + \tau_g)\} \frac{\sin \pi B(\tau + \tau_g)}{\pi B(\tau + \tau_g)}$$

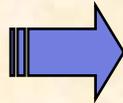
$f_0 = 0$ の場合

$$\cos \pi B(\tau + \tau_g) \frac{\sin \pi B(\tau + \tau_g)}{\pi B(\tau + \tau_g)}$$



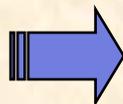
VLBI の特質

- ◆ 観測バンド幅 \propto 情報量
 - \propto (遅延時間決定精度)⁻¹
 - \propto (S/N比)^{1/2}



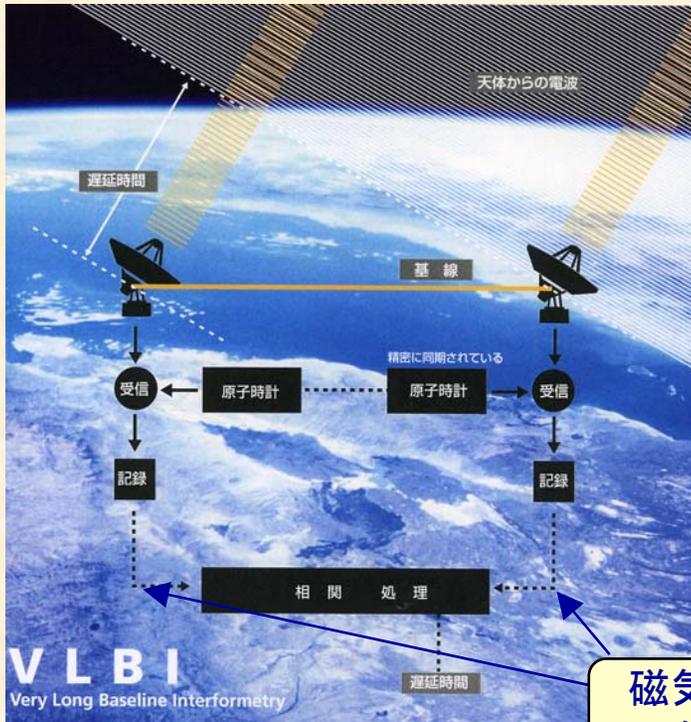
伝送速度が高速になるほど高感度

- ◆ 観測波長 / 基線長 \propto 角度分解能
- ◆ 基線長 \propto 地球姿勢決定精度

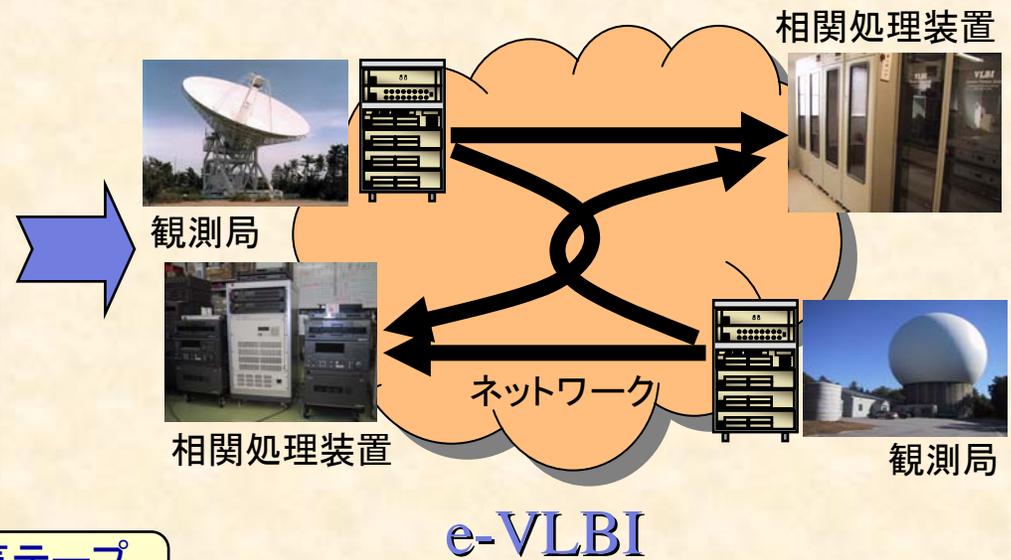


伝送距離が長いほど高性能

e-VLBIとは...



従来の VLBI



リアルタイム VLBI (e-VLBI)

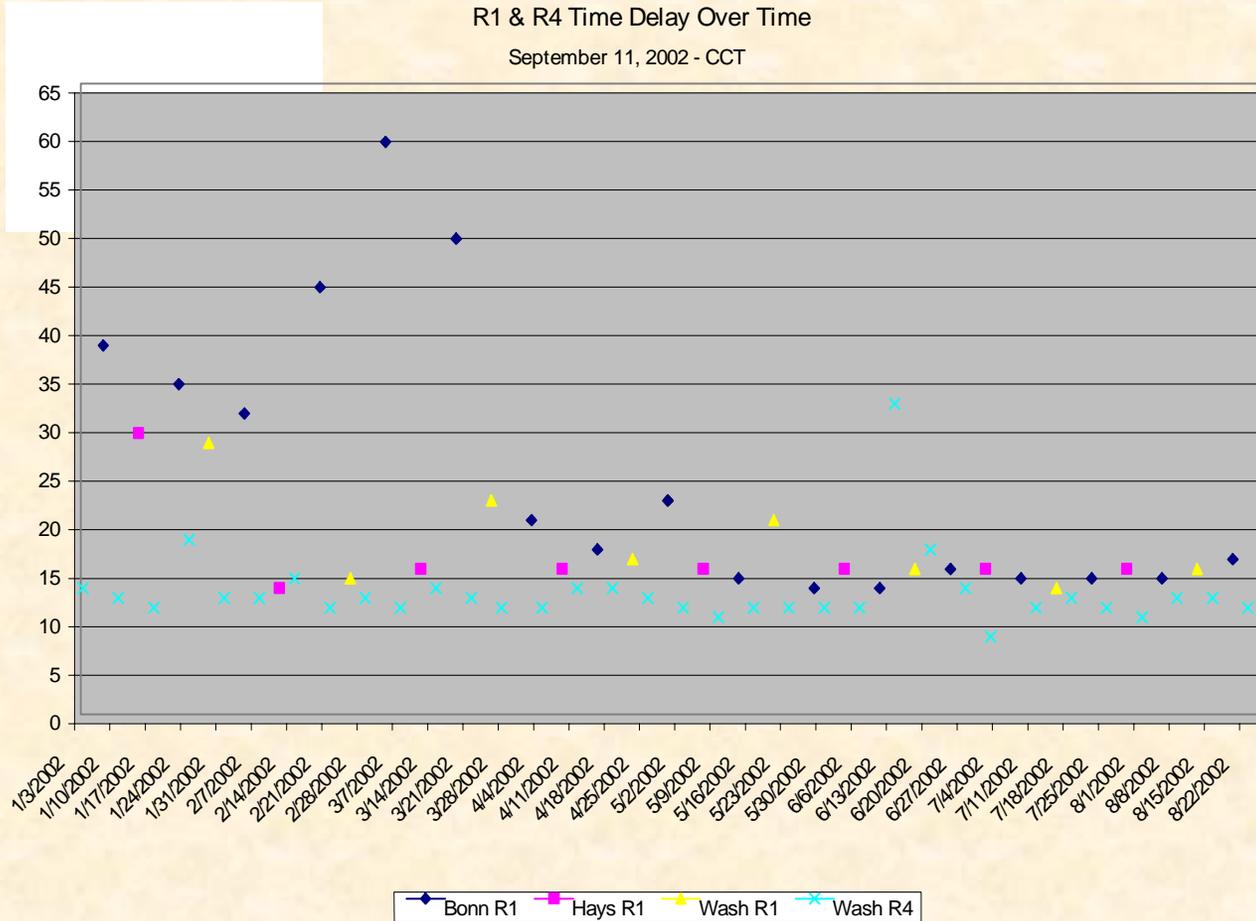
◆ 目的

- 地球姿勢パラメタのリアルタイム推定
- 観測局位置変動リアルタイムモニタリング
- 宇宙飛翔体の精密位置計測・高精度ナビゲーション
- 極微弱天体の高感度観測
- 活動的天体のモニタリング観測

◆ 特徴

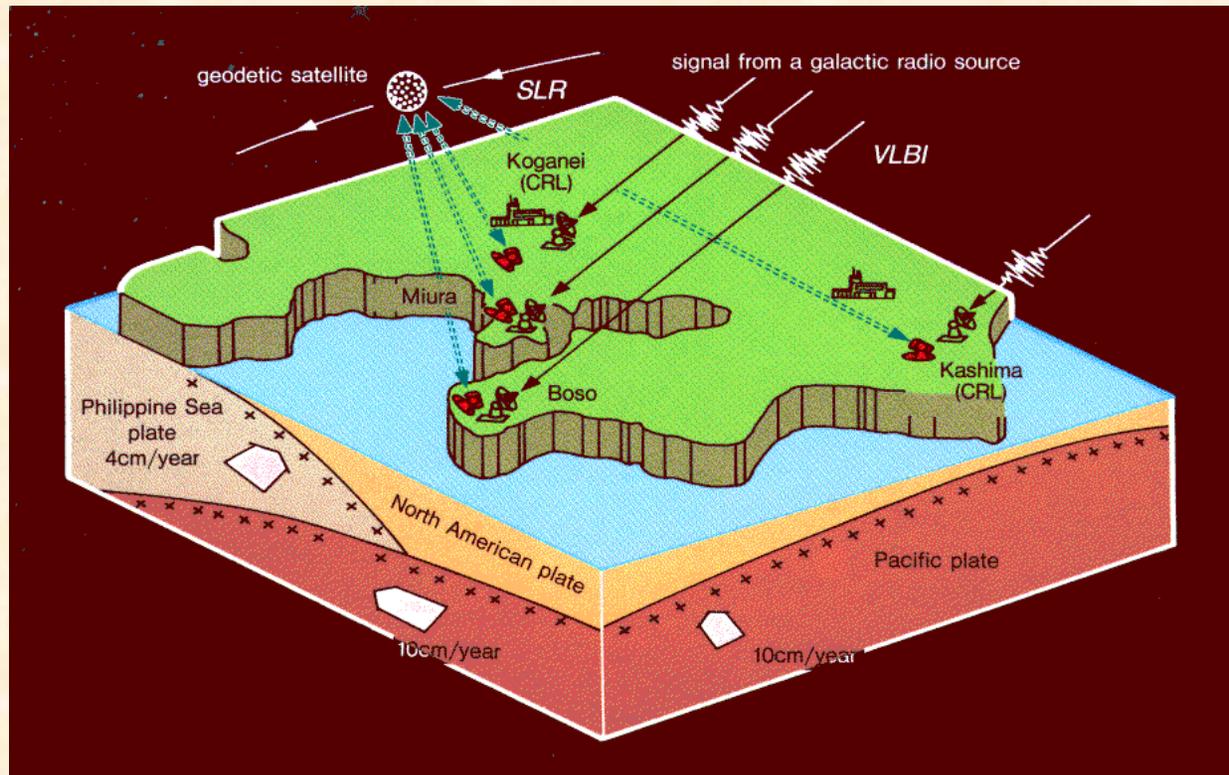
- 膨大なデータの伝送
- 比較的大きなエラーレートに対する許容性
- 長距離データ伝送: 大きな遅延時間
- 複数のデータソース

現在の国際測地VLBI実験処理に要する日数



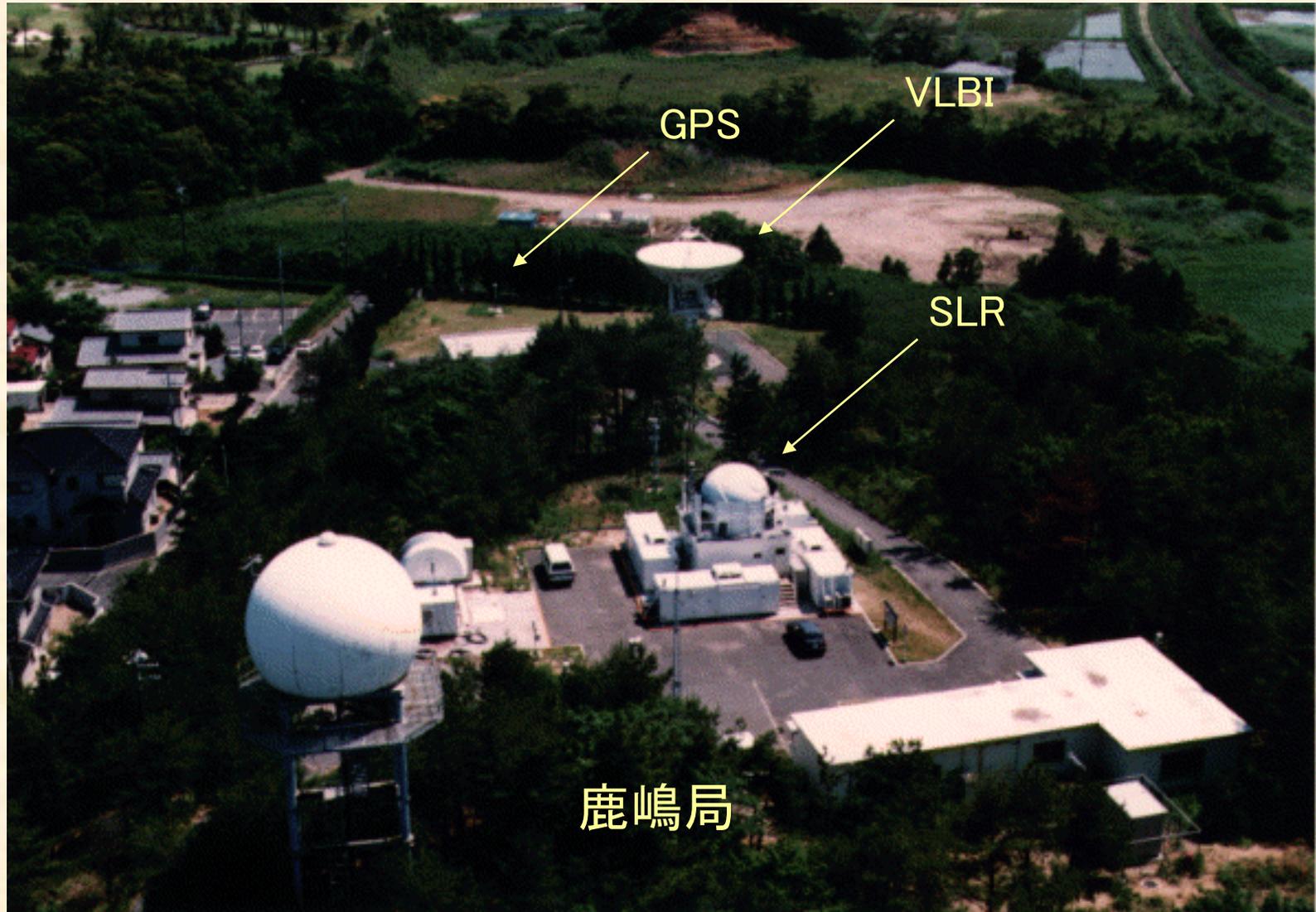
首都圏広域地殻変動観測システム(1994-2001)

KSP = Key Stone Project



VLBI(超長基線電波干渉):11mアンテナ
SLR(衛星レーザー測距):75cm望遠鏡
GPS(汎地球測位システム):測地受信機

3つの宇宙測地技術のコロケーション

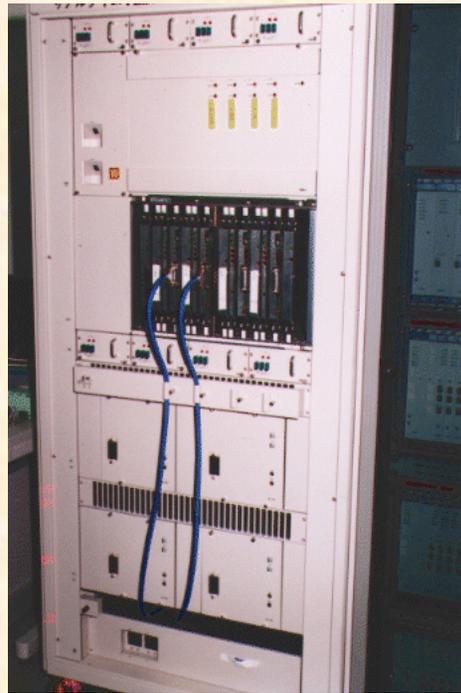


Key Stone Project (VLBI) の特徴

- ◆ リアルタイムVLBIの実現
 - リアルタイムデータ伝送システム+リアルタイム相関器の開発
- ◆ 完全自動化システム
 - 観測の自動化 → 無人運用システム
 - データ処理・解析の自動化
 - 迅速な処理と解析結果の自動公開
 - 高頻度連続観測
- ◆ 小口径・高感度VLBI観測
 - 56Mbps → 256Mbps
- ◆ 3つの宇宙測地技術のコロケーション
 - 座標系の結合・構築

リアルタイムVLBIの実現

- 2.4 Gbps 高速光通信ATMネットワーク
- 新開発データ送受信装置

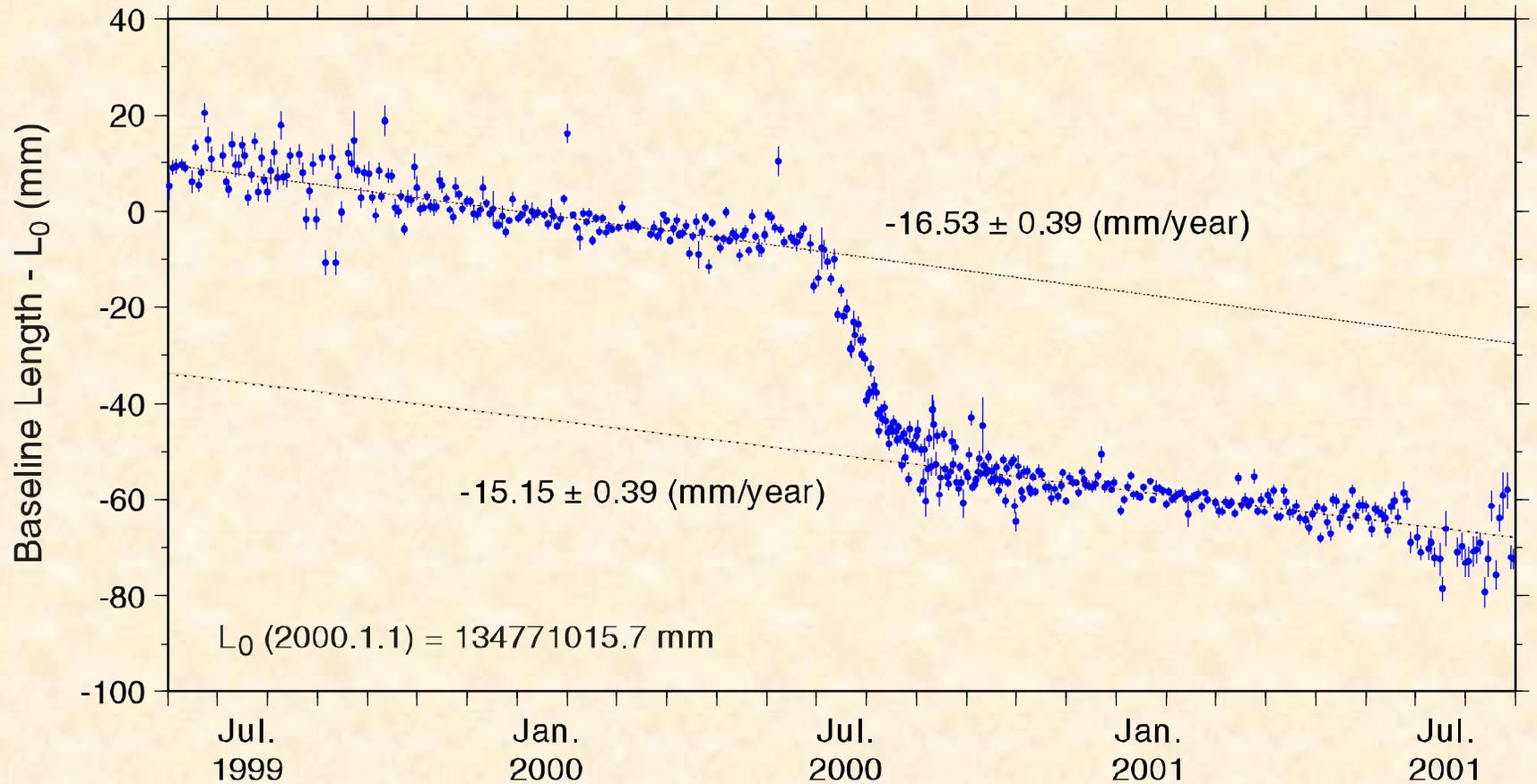


ATM データ伝送装置



リアルタイム VLBI 相関器

鹿嶋一館山の基線長変化

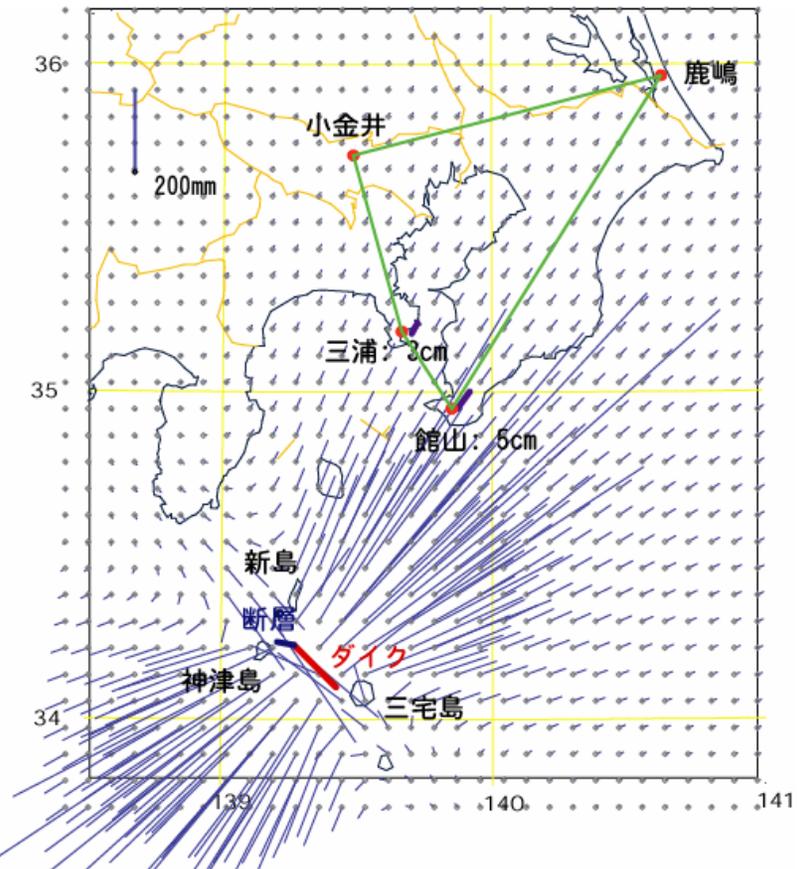


神津島東方海域の地下での岩脈状マグマ活動 が南関東の広域地殻変動を誘起

- 2000年6月26日 三宅島で地震・火山活動が始まる。
- その後、神津島東方海底で巨大なダイク(板状マグマ)が垂直に貫入したと考えられる。
- 地殻変動の影響はKSP観測網のある南房総にまで波及。
- 通信総合研究所のVLBI観測結果は、気象庁、地震調査委員会、地震予知連絡会等で活用。

観測量に基づく地殻変動モデル計算値
(2002. 6. 26. ~9. 15.)

- 名古屋大学モデル準拠
- 気象研究所MICAP-Gソフト使用

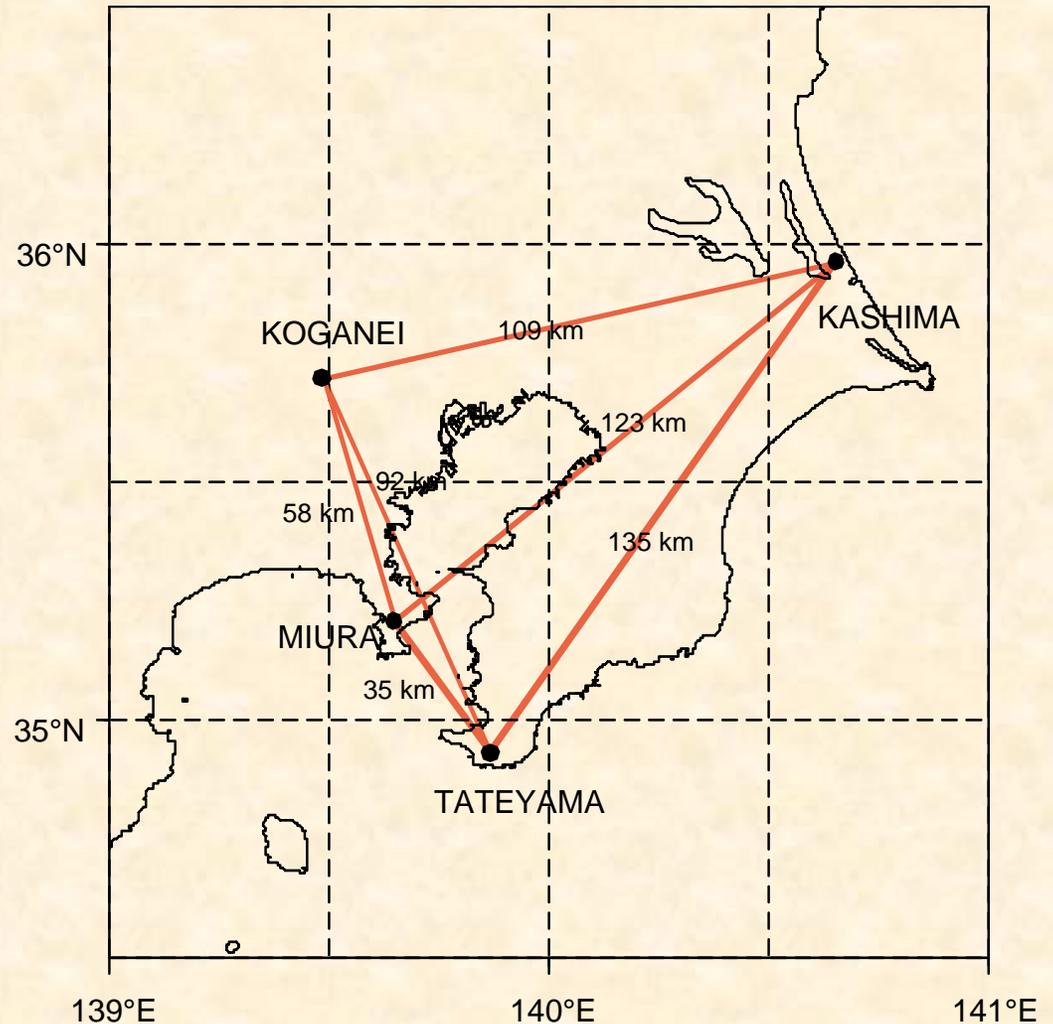


ダイクの大きさ

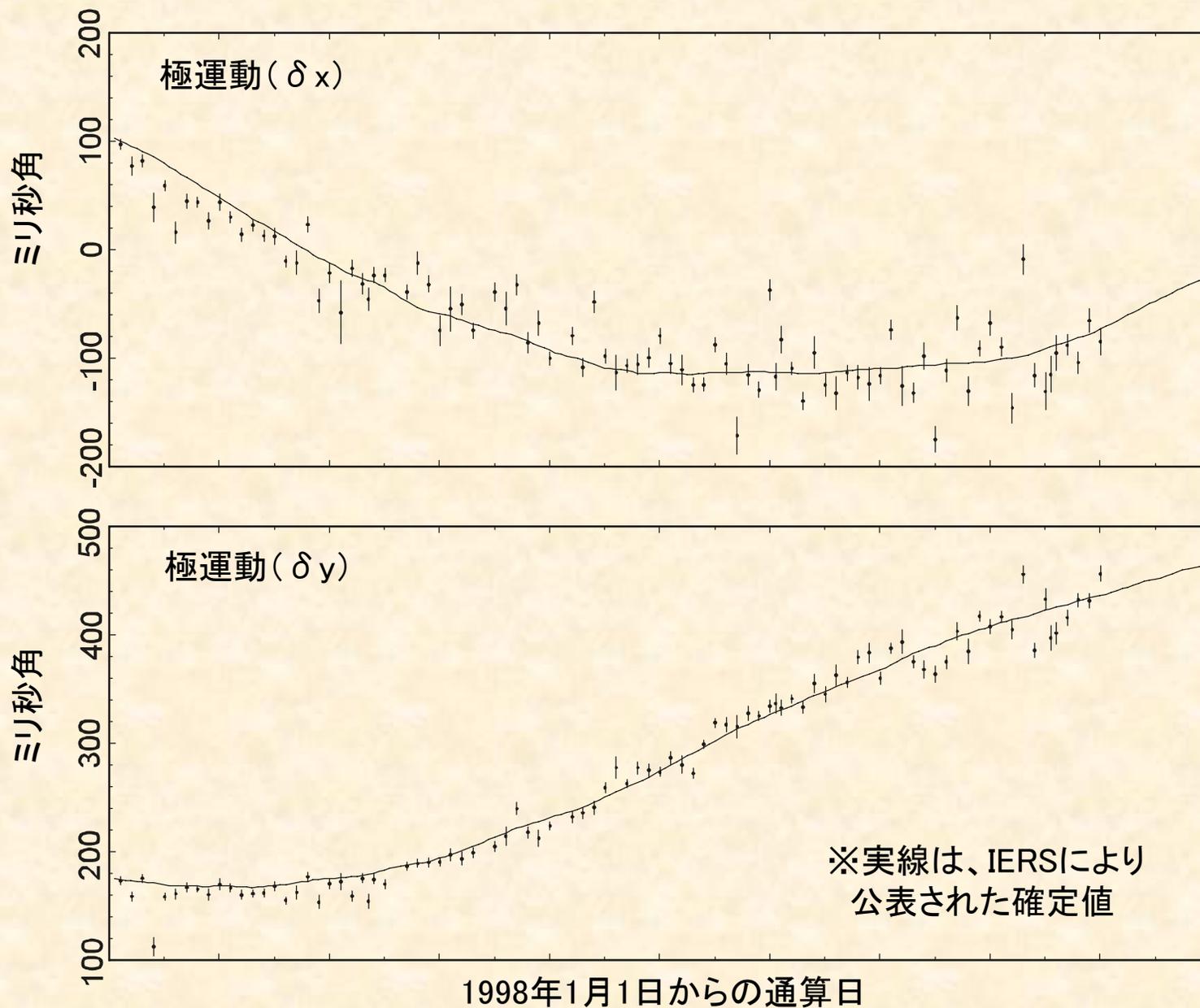
長さ: 20km × 深さ: 3-15km × 厚さ(開口): 5m

KSP データによる EOP 推定

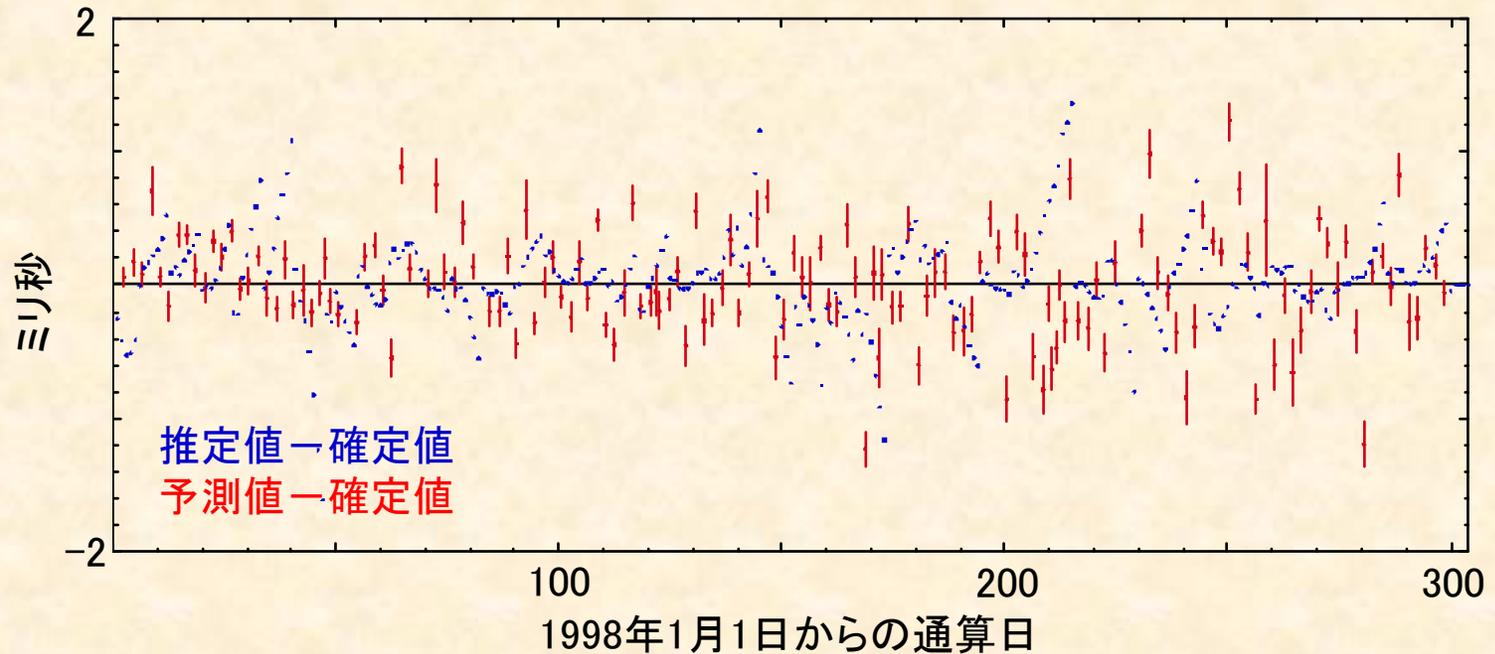
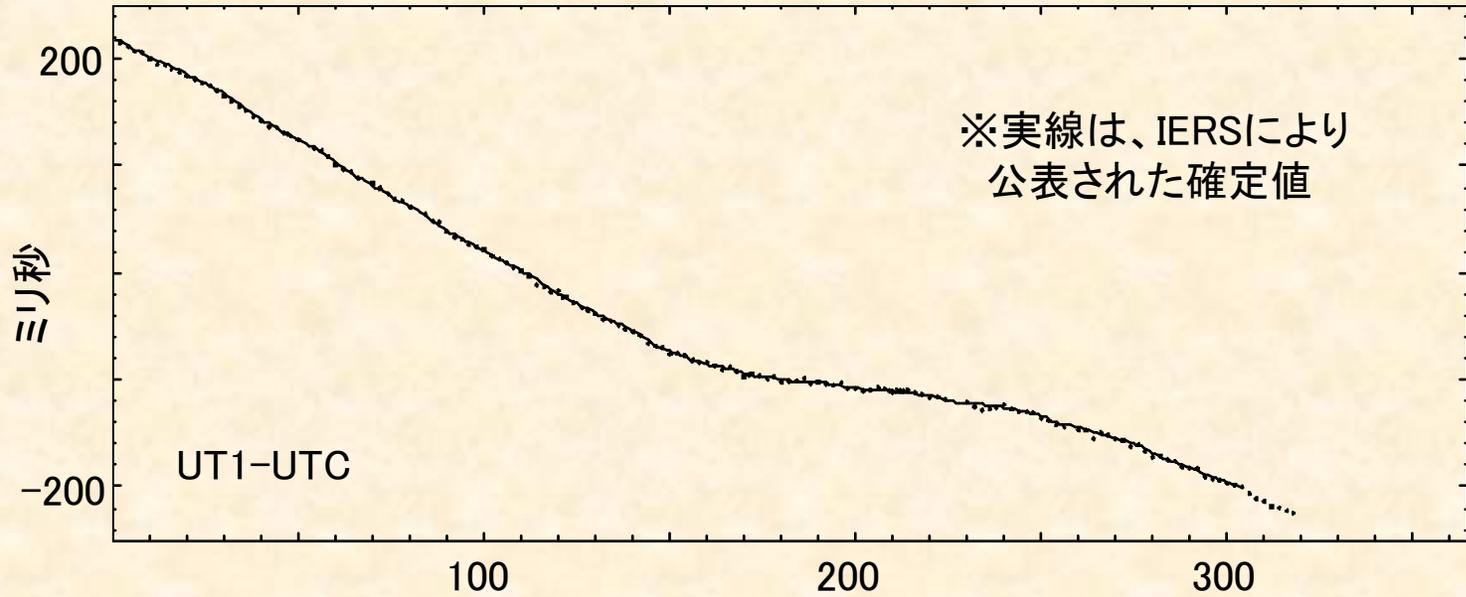
- ◆ 基線長: 135km
極運動 ($\delta x \cdot \delta y$)
10mas=6.5mm
UT1-UTC
1msec=9.8mm



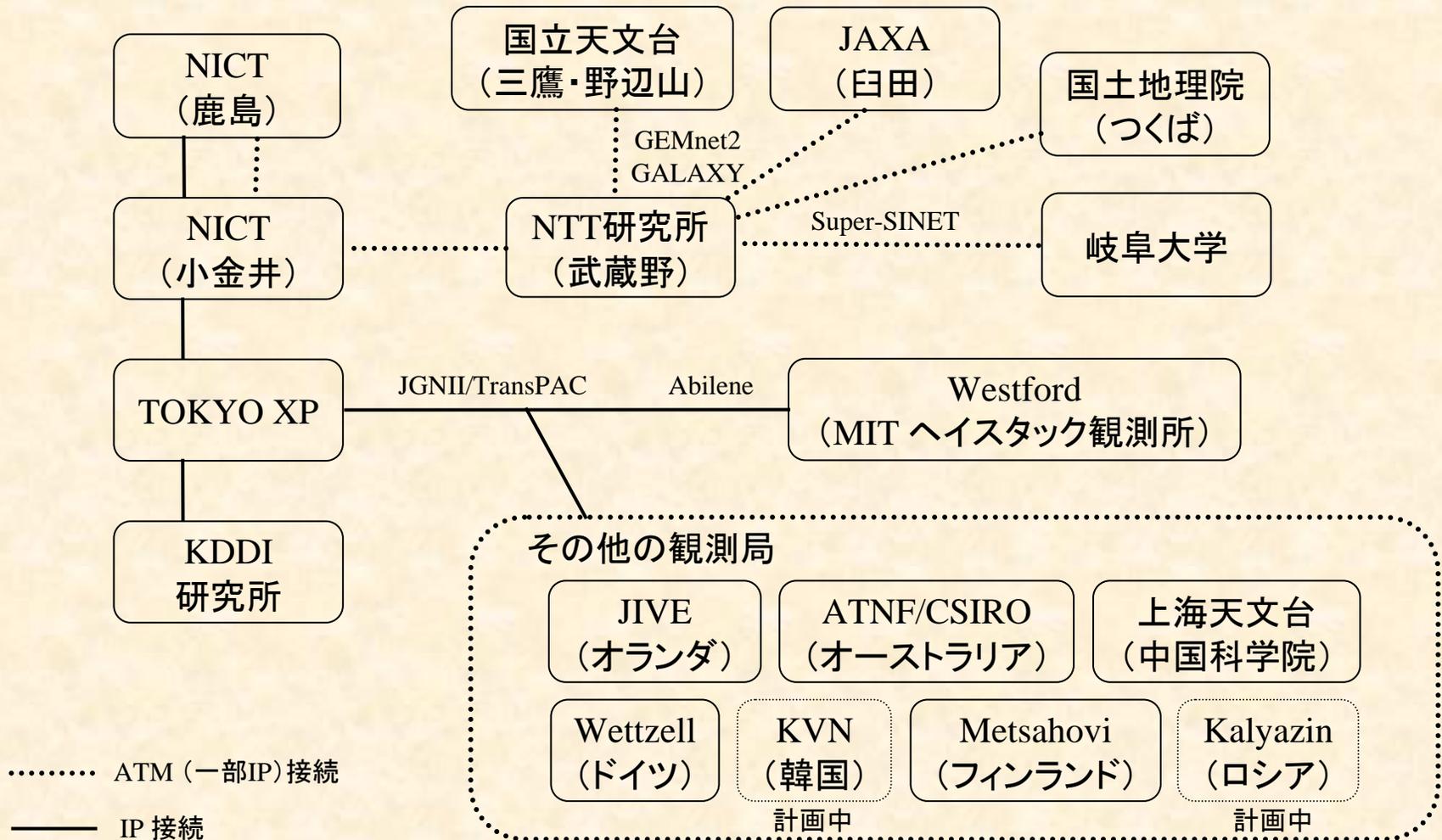
極運動推定結果



UT1-UTC 推定結果



ネットワーク接続状況



UT1 即時推定実験 : June 29, 2004



Kashima 34m

基線長 : 9502km



Westford 18m

◆ Time Sequence (JST)

- 4:00 Observing Started
- 5:00 Observing Finished
- 5:13 Data Transfer Started (from Haystack to Kashima)
- 6:28 Data Transfer Finished (~30Mbps)
- 9:16 Correlation Processing Completed (used 20 CPUs)
- 9:30 Data Analysis Completed : UT1-UTC sigma=22 microsec.

New World
Record!!

4.5 hours

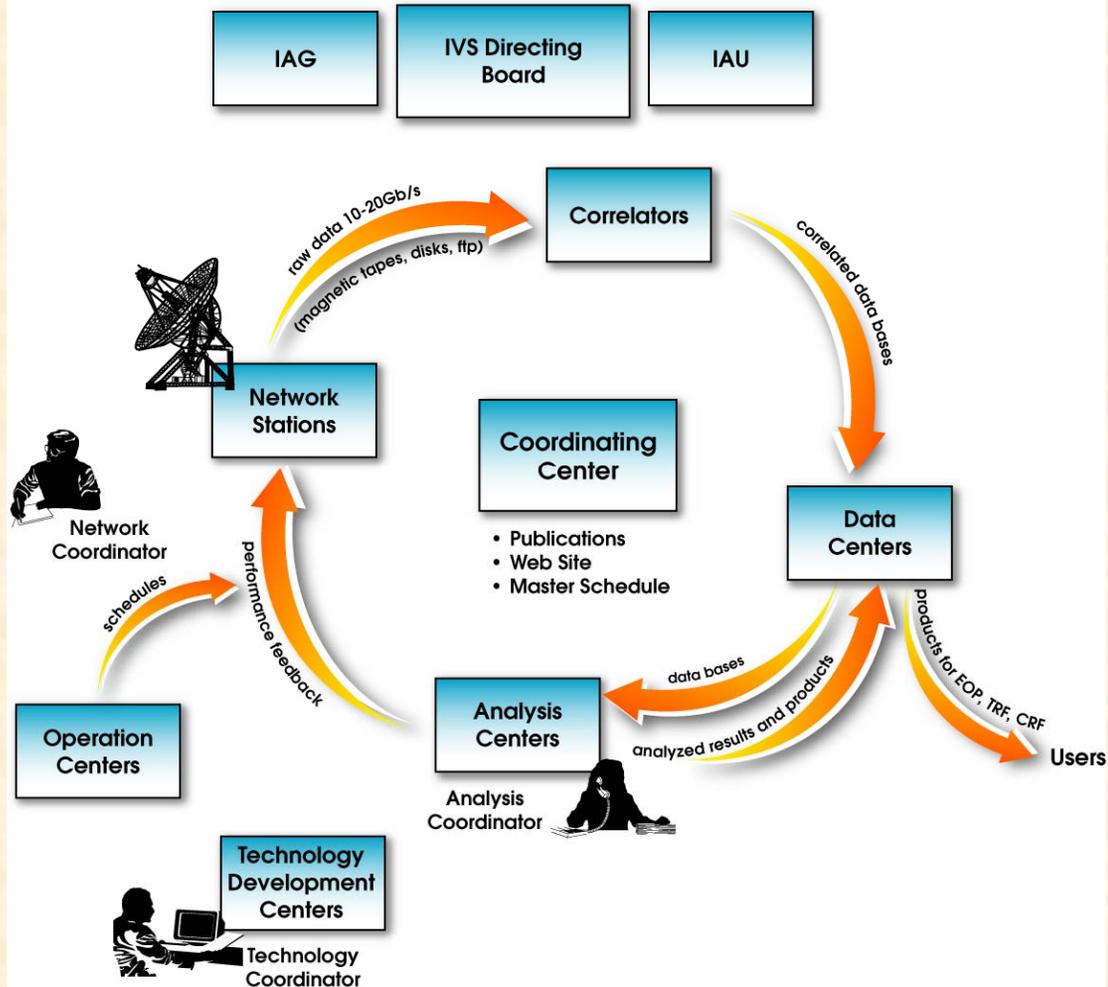
IVS : 国際VLBI事業

International VLBI Service for Geodesy and Astrometry

- ◆ 2000.1 設立
- ◆ IAG (International Association of Geodesy) の10 Services の1つ(他に IGS, ILRS, IERS, etc.)
- ◆ IAU (International Astronomical Union)のもと、IERS と共同で ICRF と EOP に責任
- ◆ 世界17ヶ国の研究機関から構成
- ◆ 国際VLBI共同実験の観測、データ処理・解析、および技術開発を調整・運営
- ◆ 日本国内からは4機関が参加
 - 情報通信研究機構、国土地理院、国立天文台、国立極地研究所

IVS の組織構成

ORGANIZATION OF INTERNATIONAL VLBI SERVICE



磁気テープから磁気ディスクへの移行

NRV last updated 040208

	2003					2004								
	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep
Correlator														
Bonn	4	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Haystack	2	2	2	4	4	4	4	6	6	6	6	6	6	6
Washington	2	2	2	4	4	6	6	8	8	8	8	8	8	8

	2003					2004								
	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep
Station														
Algonquin	thin tape	Mk5 partial	Mk5 partial	Mk5 partial	Mk5 only	Mk5 only	Mk5 only							
Fortaleza	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape								
Gilmore Creek	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape								
GGAO	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape								
HartRAO	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape								
Hobart	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape								
Kashima34	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape								
Kokee Park	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape								
Matera	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape								
Medicina	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape								
Noto	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape								
Ny Alesund	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape								
O'Higgins	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape								
Onsala	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape								
Seshan	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape								
Simeiz	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape								
Svetloe	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape								
TIGO	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape								
Tsukuba	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape								
Urumqi	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape								
Westford	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape								
Wettzell	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape								
Yebeis	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape								
Yellowknife	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape	thin tape								

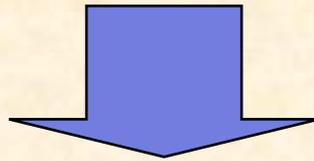
- Mk5 only
- Mk5 partial
- K5 partial
- thin tape
- thick tape

国際測地VLBI観測の現状

- ◆ IVS-R1, IVS-R4 週2回の24時間実験 (EOP)
- ◆ IVS-T2 月1回の24時間実験 (ITRF)
- ◆ IVS-CRF 月1回の24時間実験 (ICRF)
- ◆ Intensive 1~2 時間の1基線観測 (UT1)
 - Kokee-Wettzell (週5回)
 - Tsukub32-Wettzell (週2回)  現状はこの部分のみ e-VLBI を導入
- ◆ e-VLBI 化を推進し、連続観測を実現することが課題

汎用科学インターフェース(VSI)：背景

- ◆ VLBI観測装置(特にデータレコーダー)の多様化
 - Mark-III・Mark-IV・K-4・S2・VLBA
- ◆ 相互互換性(compatibility)の重要性の認識



- ◆ 標準インターフェースの仕様制定へ
- ◆ 次世代データレコーダーやリアルタイムVLBIにおける装置の互換性を確保
- ◆ 制御プロトコルや伝送プロトコルの標準化

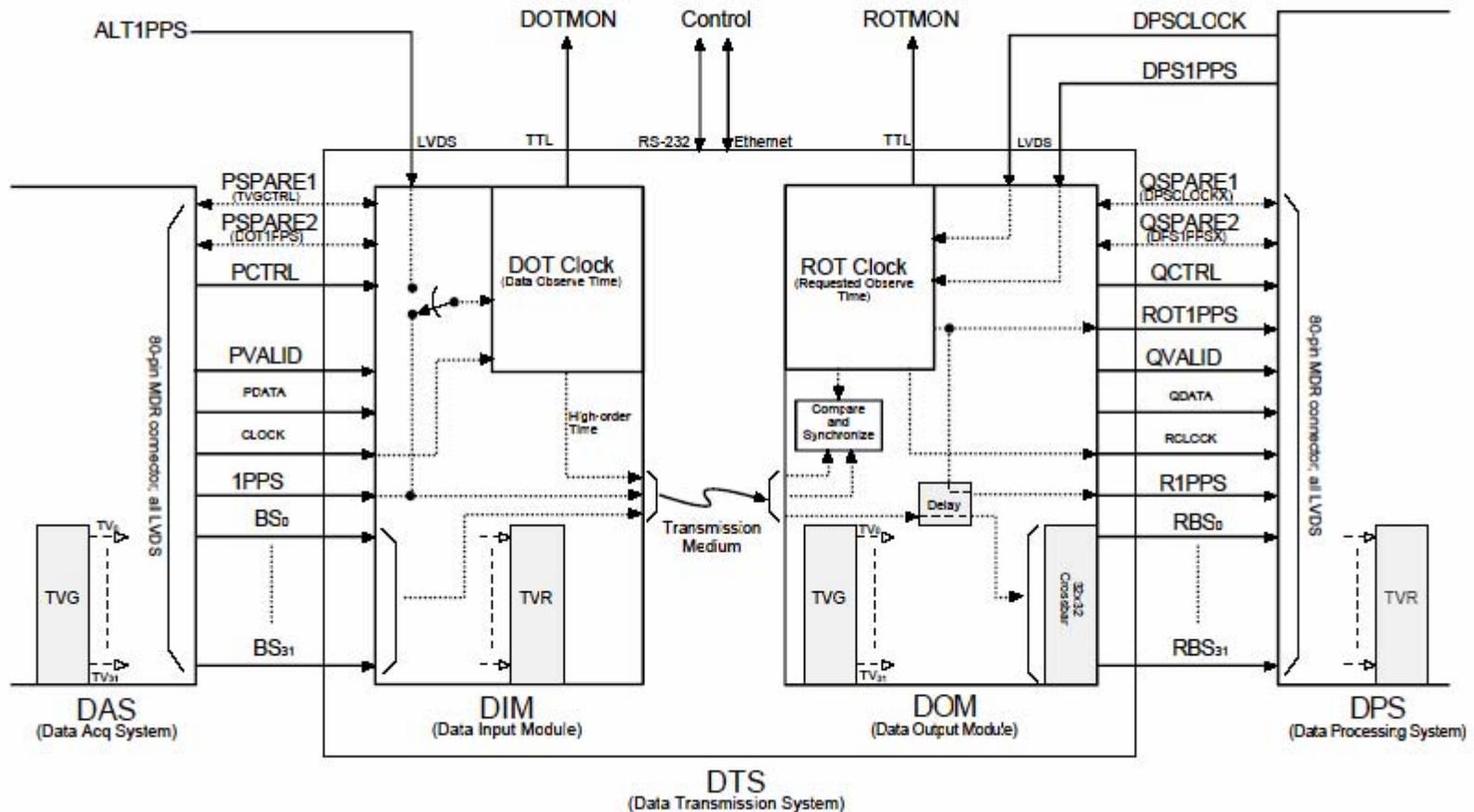
汎用科学インターフェース：VSI

- ◆ VSI
 - VLBI Standard Interface : VLBI 標準インターフェース
 - Versatile Scientific Interface : 汎用科学インターフェース
- ◆ VSI-H
 - ハードウェア仕様
 - 2000.8.7 Rev. 1.0 制定、2002.12.12 Rev.1.1 改訂
- ◆ VSI-S
 - ソフトウェア(制御コマンド&プロトコル)仕様
 - 2003.2.13 Rev. 1.0 制定
- ◆ VSI-E
 - ネットワークデータ伝送プロトコル仕様
 - 2004.1.29 Draft Proposal Rev. 2.7
 - IETF (Internet Engineering Task Force) への提案準備中

ハードウェア仕様: VSI-H

- ◆ 以下におけるコネクタ形状や電気的特性を規定
 - A/Dサンプリング部⇔データレコーダ
 - A/Dサンプリング部⇔ネットワーク
 - データレコーダ⇔相関器
 - ネットワーク⇔相関器
- ◆ そのほか、互換性を最大限達成するための規定
 - 1PPS信号・時刻符号形式
 - 制御コマンド通信線
 - テスト信号生成機能

VSI-H のモデル



VSI-H : 特徴

- ◆ 将来の観測装置をターゲットにすると同時に、すでに開発されたシステムは、最大限可能な範囲で対応する。
- ◆ 1024Mbps (オプションで 2048Mbps) のデータレートまで対応。
- ◆ 観測・相関処理・データコピーの各局面で異機種間の互換性を確保する。
- ◆ DTSはDASとDPSから見てできる限り透明に。
- ◆ DTS-DIM間とDOM-DPS間の2つのインターフェースをほぼ対称化。
- ◆ 相関処理時には、外部から与える時刻に自律的に同調。

VSI-H : 仕様(1)

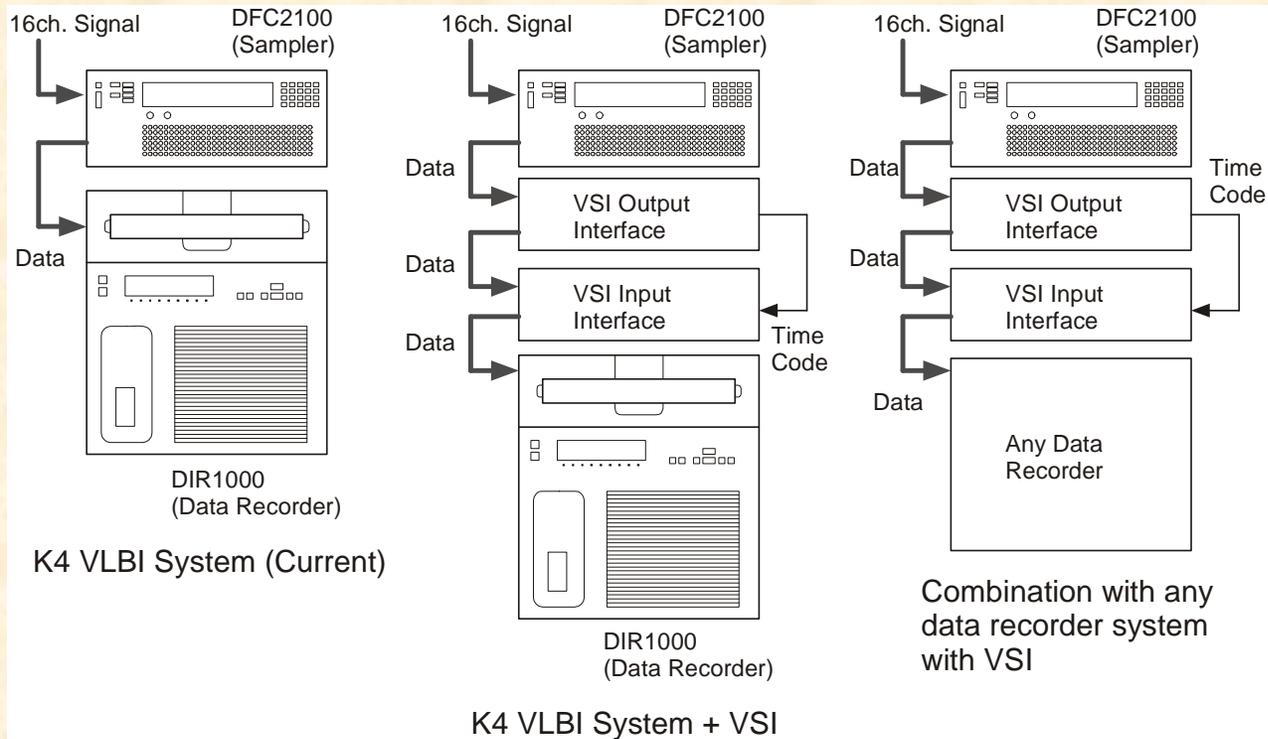
- ◆ ケーブル長 : 最大15m
- ◆ 信号特性 : LVDS (従来はECLが主流)
- ◆ 信号コネクタ : MDR80, MDR14, BNC
- ◆ テスト信号発生機能、クロスバースイッチ
- ◆ 制御線 : RS-232C (RJ45/DB9) + Ethernet (10/100BaseT)
- ◆ Data Valid Line : 1本(必須) + ラインごと(オプション)
- ◆ Clock Rate : 2, 4, 8, 16, 32 (, 64) MHz \pm 100 ppm

VSI-H : 仕様(2)

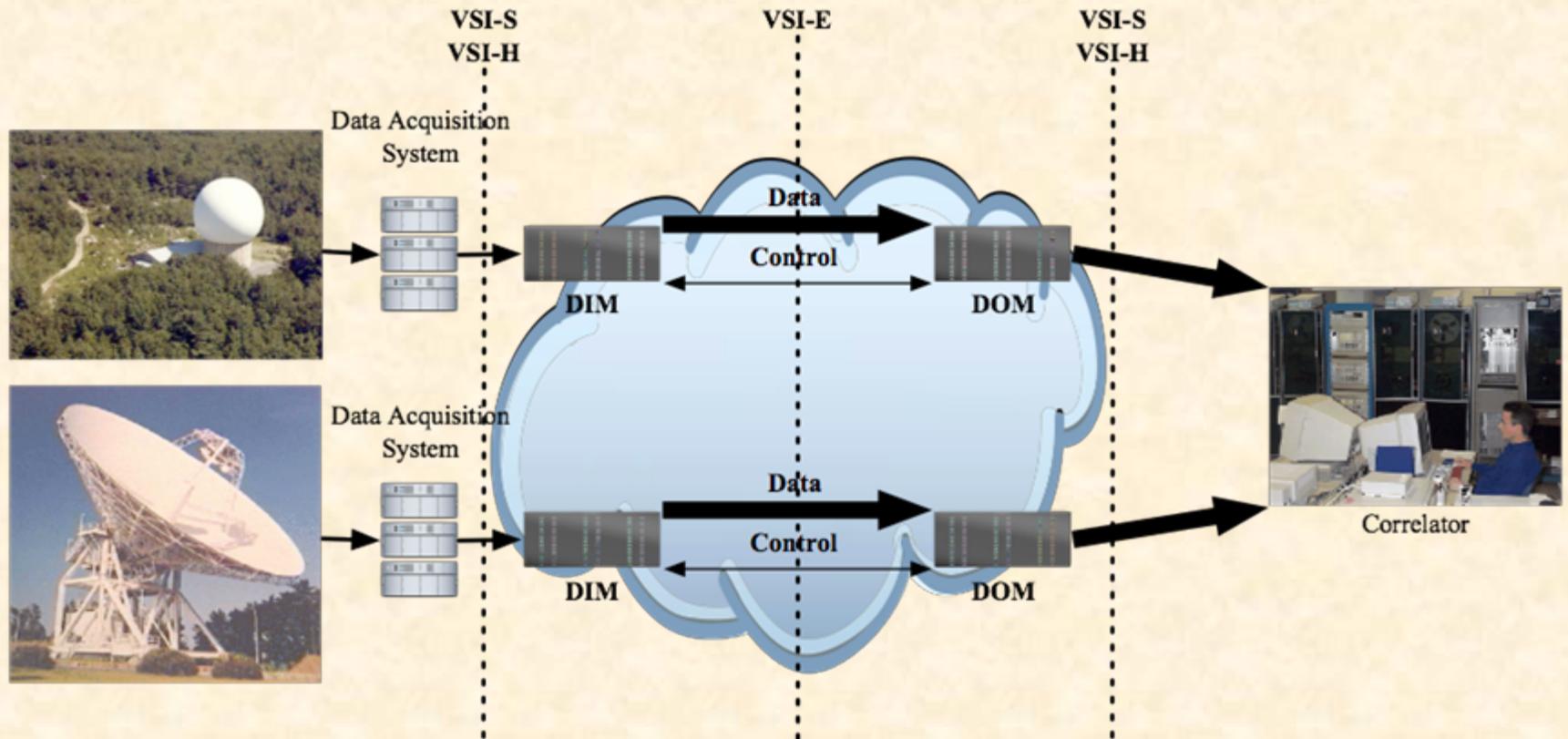
データ転送 速度	クロック信号 周波数	アクティブビット 列の数に対応する 総データレート (Mbps) の変化					
		32 本	16 本	8 本	4 本	2 本	1 本
32 MHz	32 MHz	1024	512	256	128	64	32
16 MHz	32, 16 MHz	512	256	128	64	32	16
8 MHz	32, 16, 8 MHz	256	128	64	32	16	8
4 MHz	32, 16, 8, 4 MHz	128	64	32	16	8	4
2 MHz	32, 16, 8, 4, 2 MHz	64	32	16	8	4	2

可能なデータ転送速度とクロック周波数の組み合わせ

既存のデータレコーダによる接続



VSI-E : データ伝送プロトコルの標準化

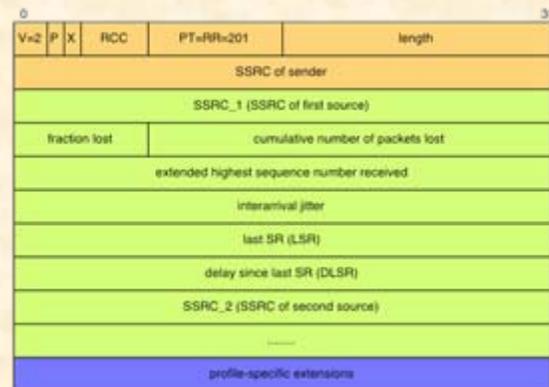
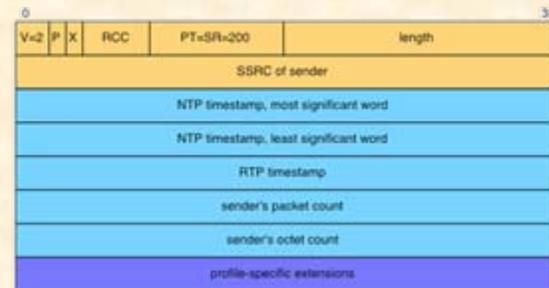
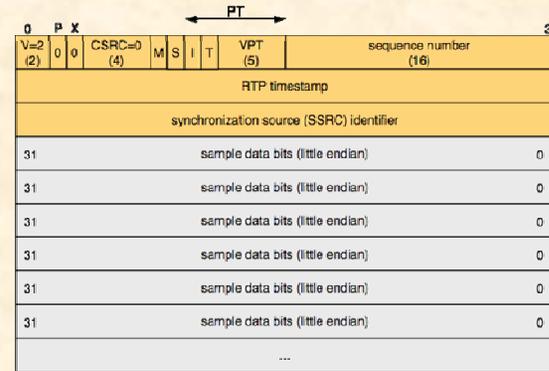


VSI-E : RTP/RTCP Packets

- ◆ RTP Data packet
 - used to transport data

- ◆ RTCP Sender Report
 - Timestamp
 - allows sources to distribute transmission statistics and relationship between sender RTP timestamp and sampling time reference

- ◆ RTCP Receiver Report
 - used by receivers (e.g. correlator) to distribute quality of reception statistics:
 - E.g. fractional packet losses, cumulative number of packets lost, interarrival jitter etc.



VLBI 観測・処理システムの開発の歴史



K3 Correlator (Center)
K3 Recorder (Right)

K3 System

1983~
Longitudinal Recorder
Open Reel Tapes
Hardware Correlator



K4 Terminal

K4 (KSP) System

1990~
Rotary Head Recorder
Cassette Tapes
Hardware Correlator
e-VLBI with ATM



K4 Correlator



K5 Data Acquisition
Terminal

K5 System

2002~
PC based system
Hard Disks
Software Correlator
e-VLBI with IP

K5 システムの開発

ADS1000

(1024Msample/sec 1ch 1 or 2bits)



ADS3000

(2048Msample/sec 1ch 8bits + FPGA)



PC-VSI Board

(~2048Mbps)



VSI

VSI

Correlator
other DAS

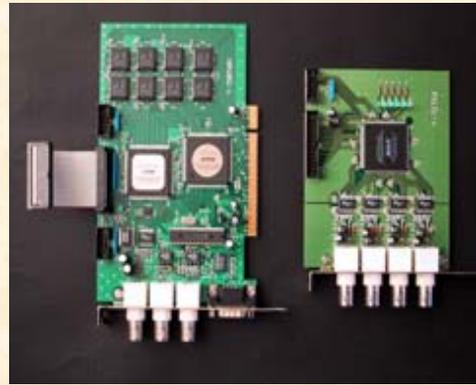


ADS2000

(64Msample/ch·sec, 16ch, 1 or 2bits)

IP-VLBI Board

(~16Msample/ch·sec, ~4ch, ~8bits)

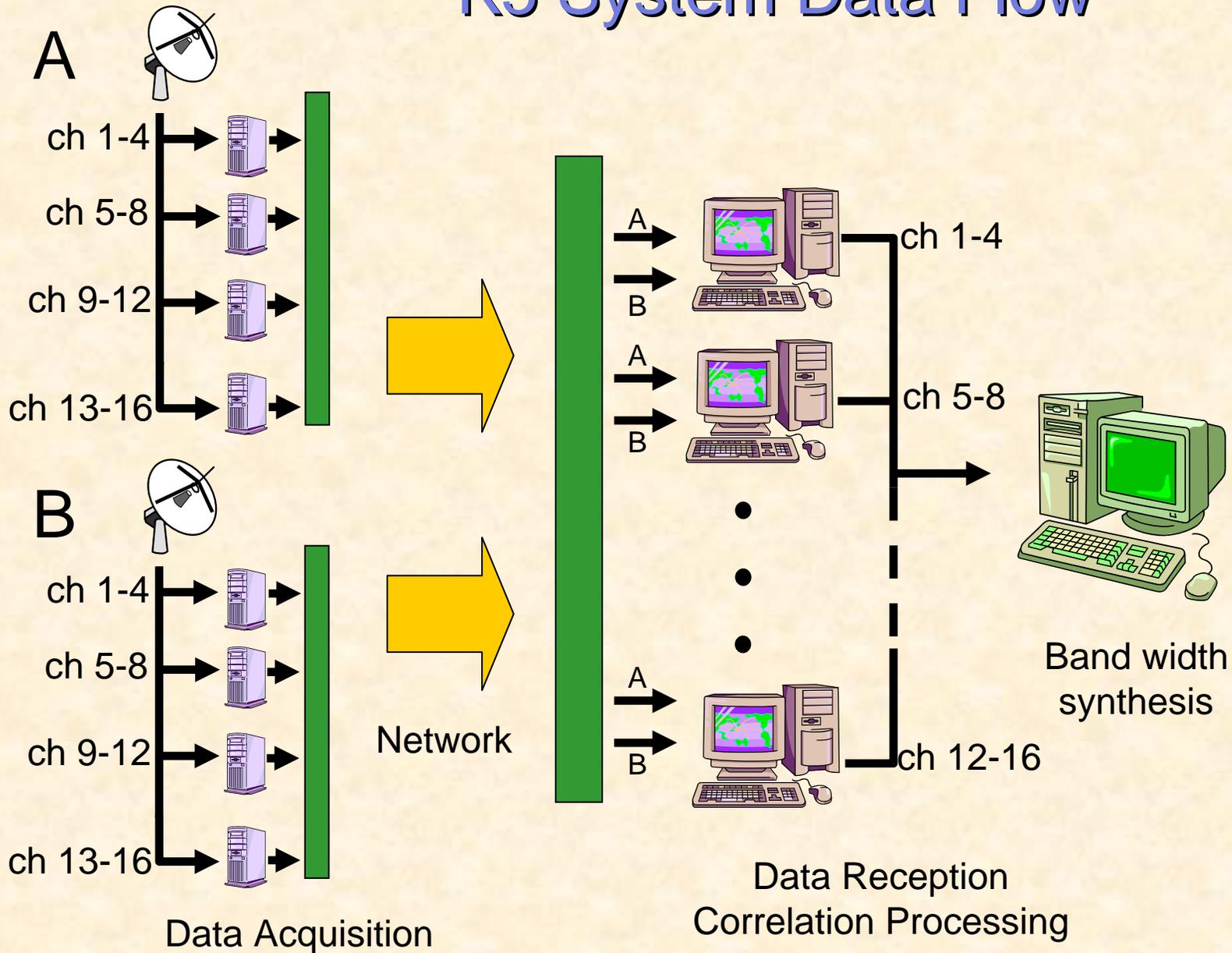


Internet



PC : Data Acquisition
Correlation

K5 System Data Flow



多数の計算機による分散相関処理

5cor-status - Microsoft Internet Explorer

http://ryu.crl.go.jp/5cor/

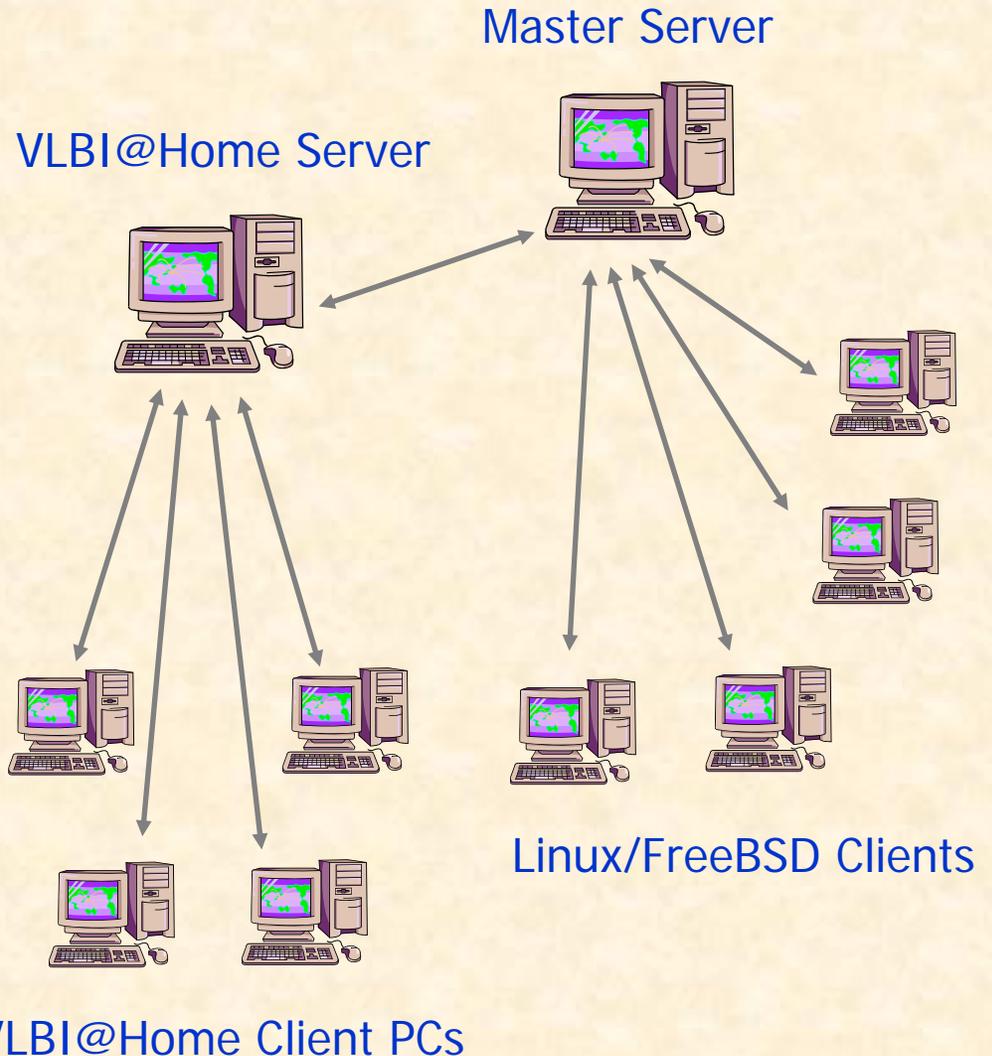
Ｋ 5 相関処理ステータス

通信総合研究所 宇宙通信研究センター
Communication Research Laboratory

実験コード名	データ総数	処理済	処理中	処理待ち
JD0306	28	3	3	22

Obs	Baseline	Apri file	Mark	host	Start	Stop
1	KASHIMA-GIFU11	ape19702000RYc.bt	●	byakko	031118180719	031118183127
2	KASHIMA-GIFU11	ape197020610RYc.bt	●	seiyuu	031118180733	031118211308
3	KASHIMA-GIFU11	ape197021950RYc.bt	●	byakko	031118183128	031118113510
4	KASHIMA-GIFU11	ape197022640RYc.bt	●	seiyuu	031118211309	*****
5	KASHIMA-GIFU11	ape19702305RYc.bt	●	byakko	031118213511	*****
6	KASHIMA-GIFU11	ape19702305RYc.bt	●	K5la	031118213623	*****
7	KASHIMA-GIFU11	ape19702305RYc.bt	●	*****	*****	*****
8	KASHIMA-GIFU11	ape19702305RYc.bt	●	*****	*****	*****

Correlation Master Table



まとめと今後の課題

- ◆ e-VLBI : 高速ネットワークが可能にするサイエンス & ネットワーク技術の研究開発をドライブするアプリケーション
- ◆ 研究開発のキーワード
 - 高速化 : 共有ネットワーク環境での高速・長距離伝送、標準化、分散処理
- ◆ 課題
 - 開発された観測システム、処理システムの汎用化
 - 広範なアプリケーションによる利用の促進