

e-VLBI

～ 高速ネットワークによる電波望遠鏡の結合 ～

関戸 衛

(情報通信研究機構 鹿島宇宙技術センター)

川口則幸

(国立天文台 光結合VLBI推進室)

発表あらまし

- ◆ **VLBI**(超長基線電波干渉計)とは？
 - 用途(電波・位置天文学、測地学、宇宙工学)
- ◆ VLBIの観測と解析、干渉計の成立条件
- ◆ VLBIの条件と通信ネットワーク
- ◆ VLBI観測のこれまで(NICT)
- ◆ 光結合VLBI(天文台、NICT、国土地理院、岐阜大、山口大、NTT、SINET、JGN2)

VLBIとは？

VLBI = 超長基線電波干渉計



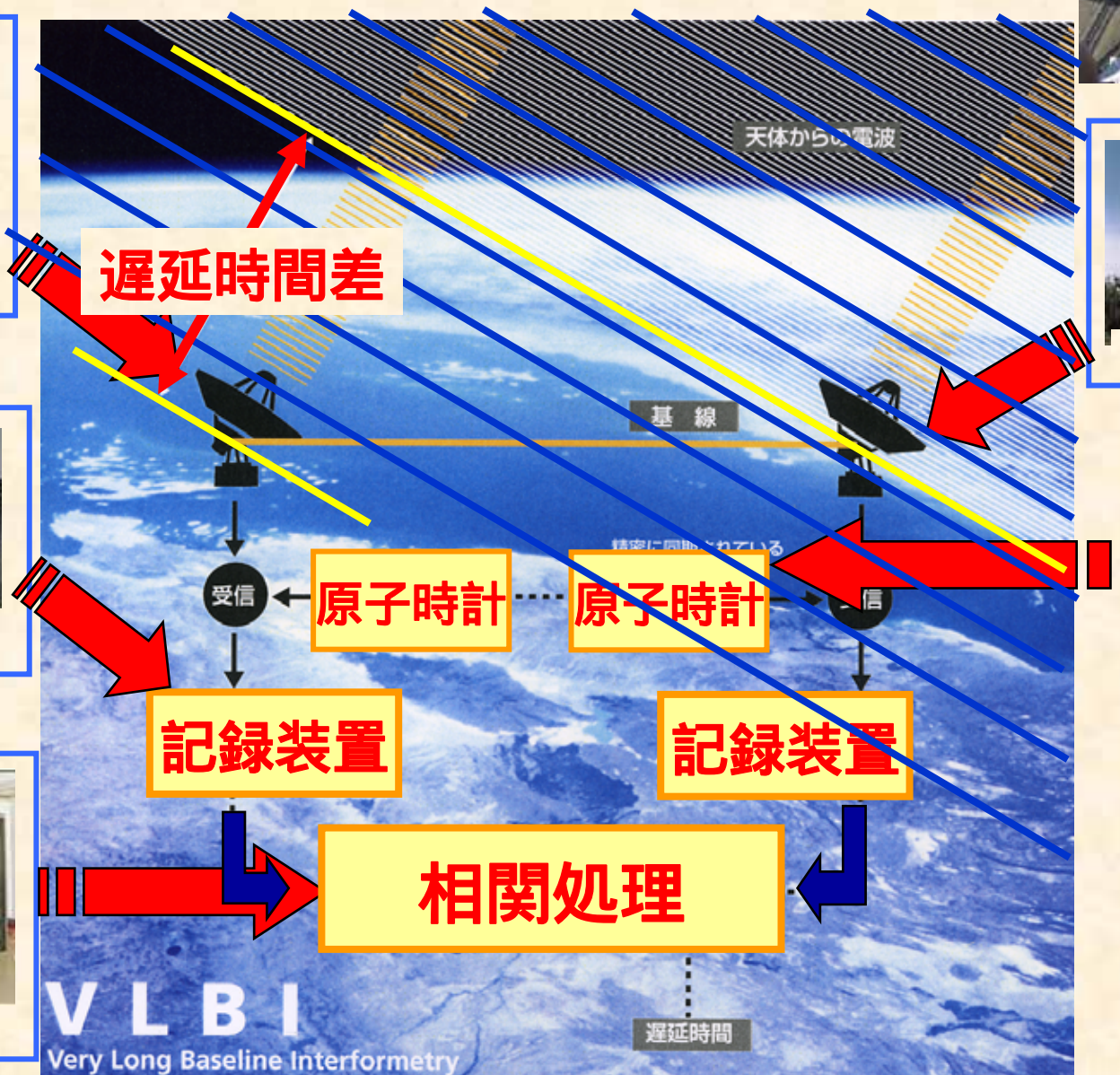
電波望遠鏡



大容量記録装置



相関処理



電波望遠鏡



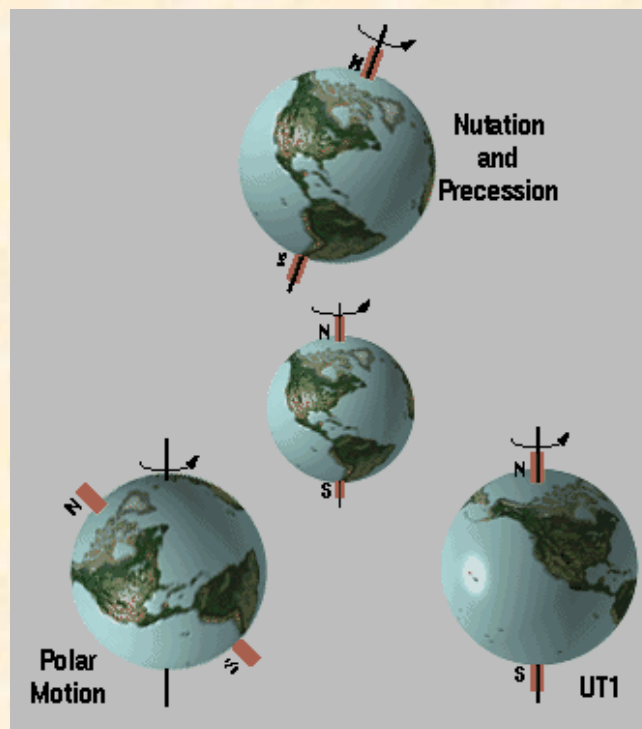
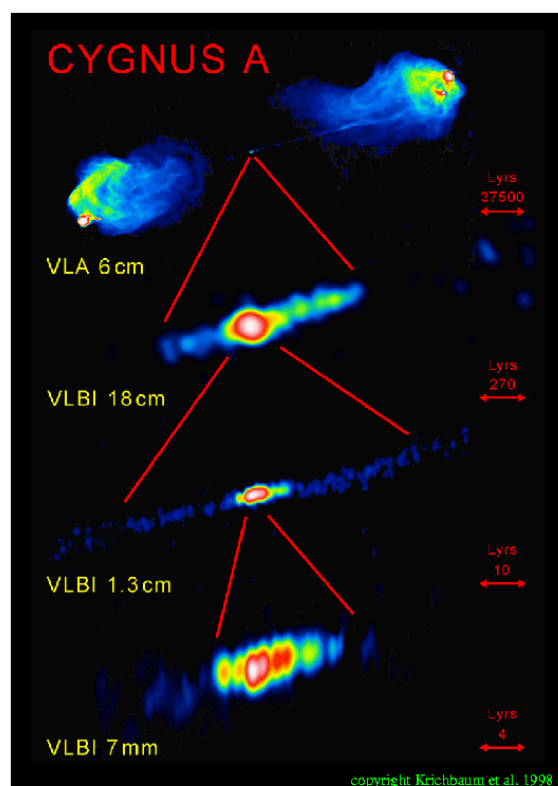
原子時計
(水素メーザ)



VLBIの応用

VLBI: 人類の持つ最高の空間分解能を誇る宇宙観測手法

- ◆ ハッブル宇宙望遠鏡(0.1秒角)の100倍～1000倍の解像度を持つ
- ◆ 天球座標系の構築(20マイクロ秒角)



ユーラシア
プレート

北アメリカプレート

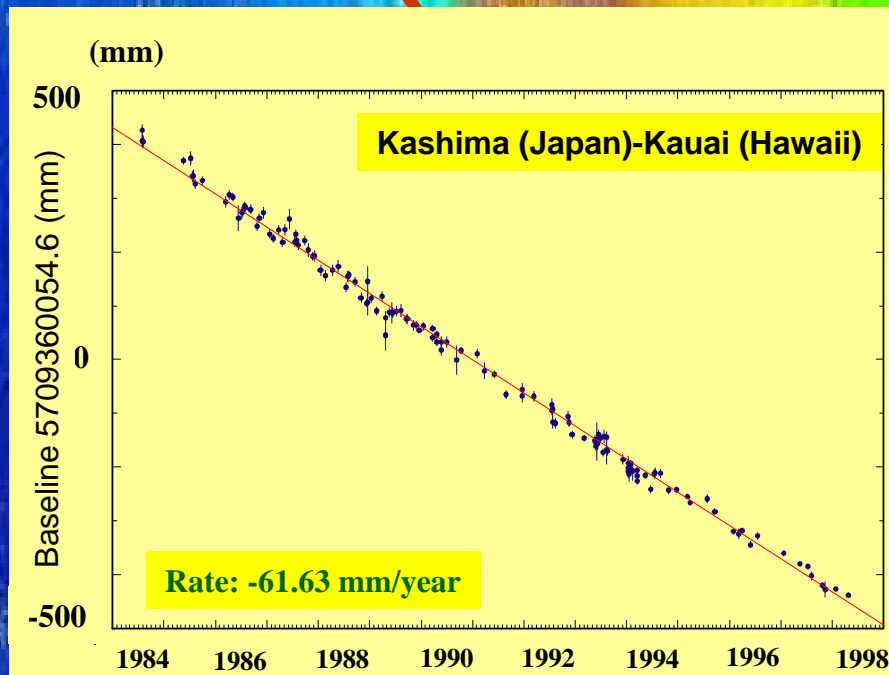
VLBI: プレート運動をミリメートル精度で計測

鹿島

フィリピン海
プレート

カウアイ

太平洋プレート

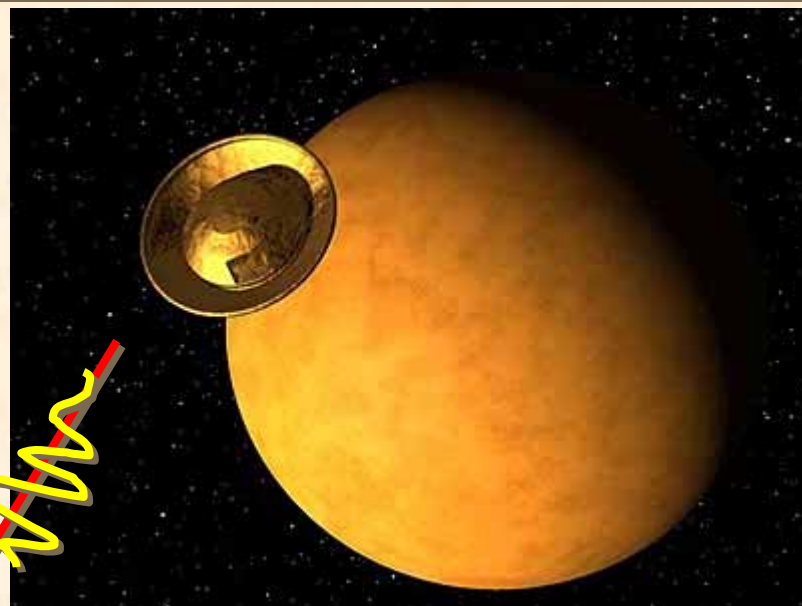


工学的応用：宇宙飛行体ナビゲーション

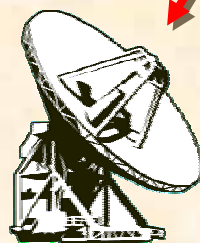
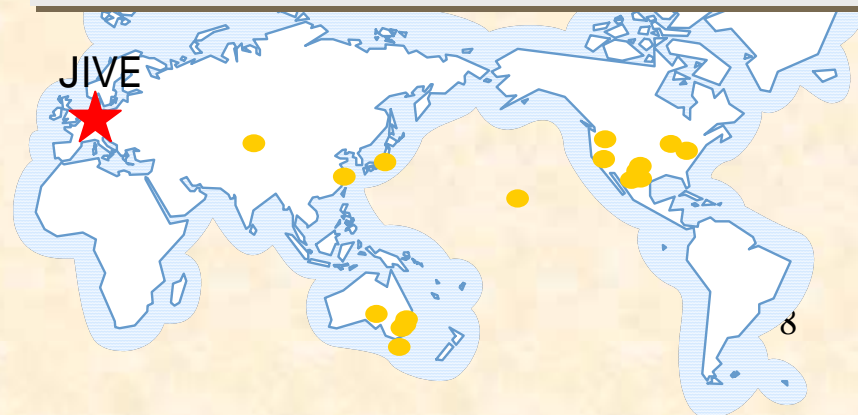
ESAの土星探査ミッション カッシーニ・ホイヘンス



ホイヘンスVLBL観測：ホイヘンス位置の
精密計測によりタイタン大気の風を測定



ホイヘンス観測処理局 および参加局 (全17局)

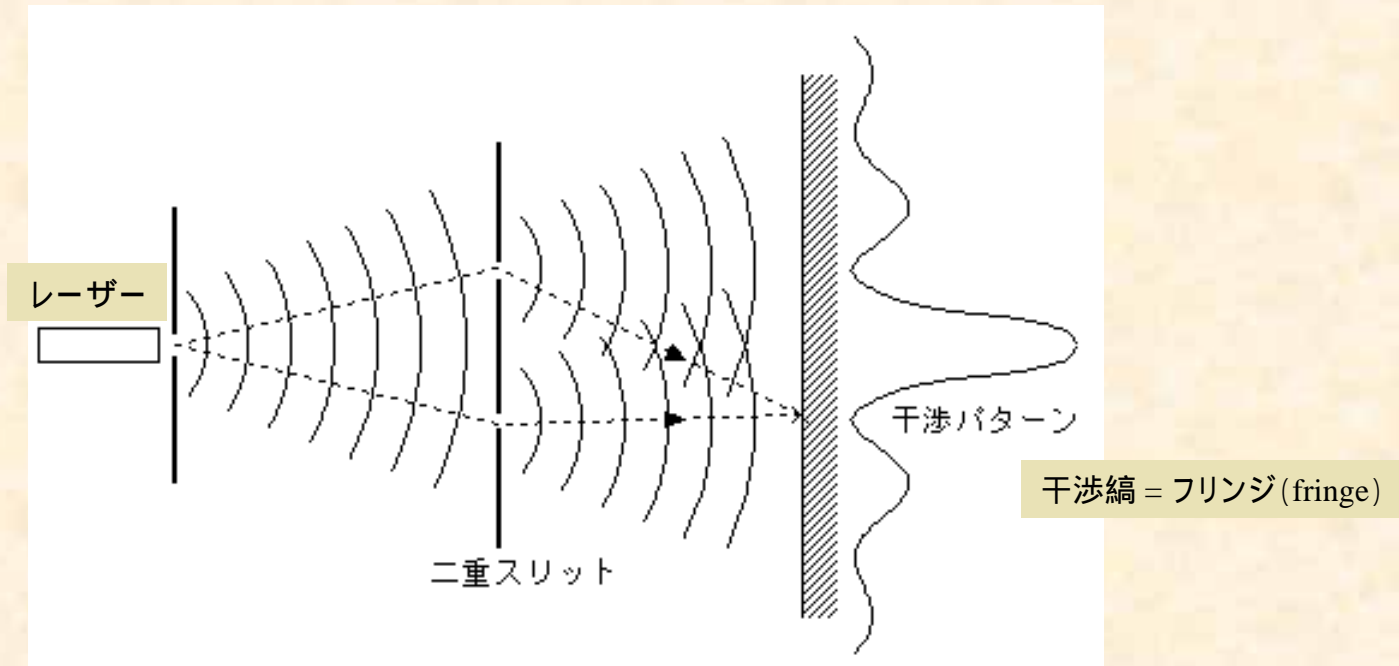


©JAXA

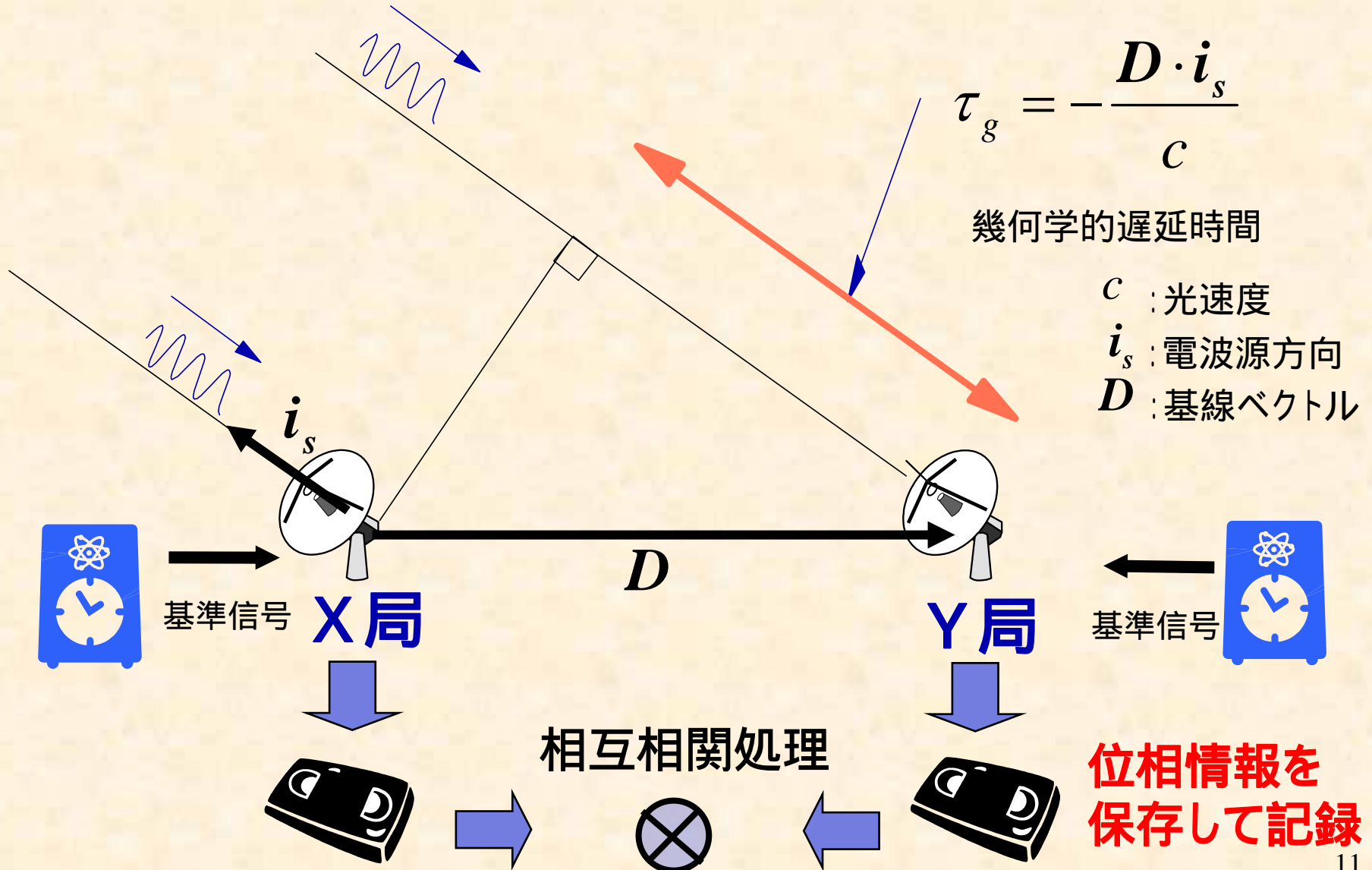


VLBI観測と解析・干渉計

干渉



電波干渉計のデータ記録・伝送



VLBIの観測量(測地・位置天文)

$$\tau = \tau_{geo} + \tau_{clock} + \tau_{atm} + \tau_{ion} + \dots$$

電離層

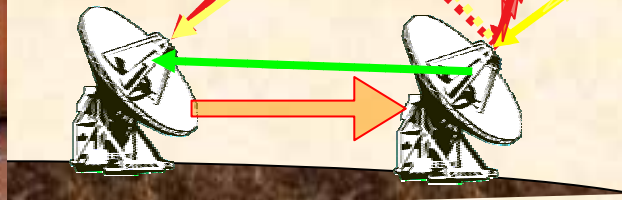
大気

遅延時間

Spacecraft



Quasar

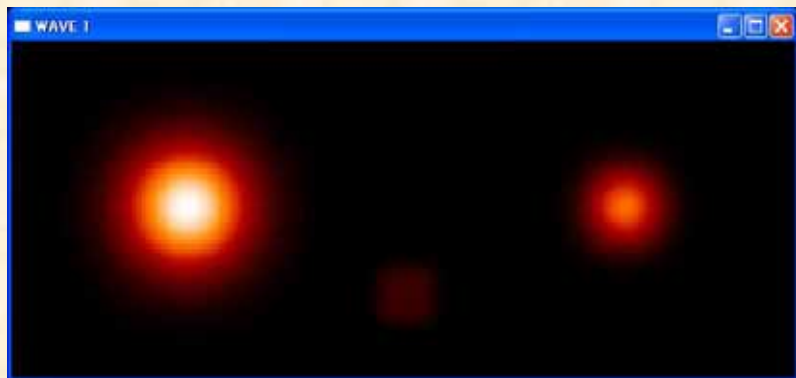


VLBIのデータ解析(測地・位置天文)

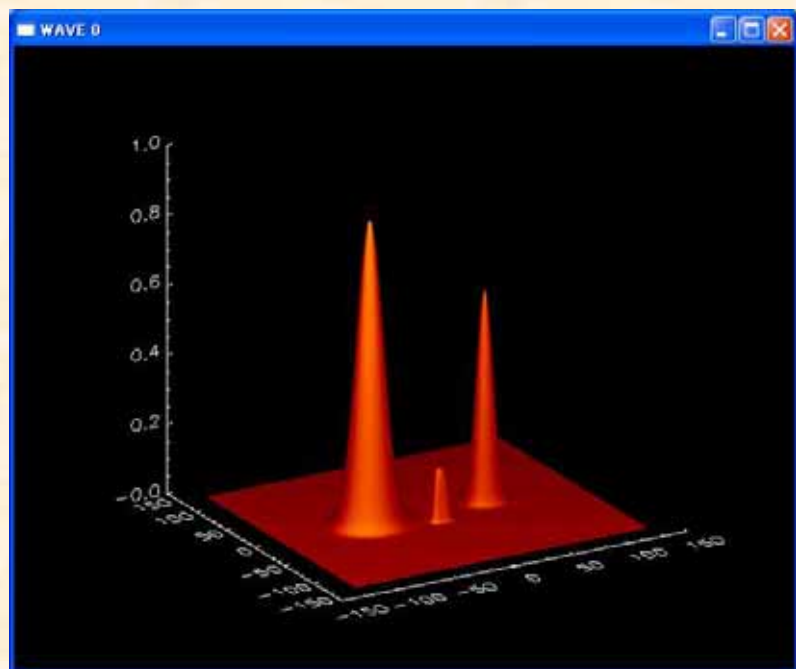
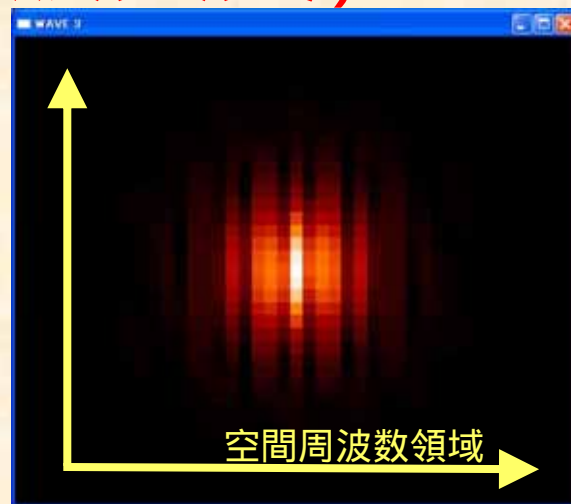
$$\begin{array}{l} \tau = \tau_{geo(t,S,B)} + \tau_{clock(t)} + \tau_{atm(El)} + \tau_{ion(El)} + \dots \\ \vdots \qquad \qquad \qquad \vdots \end{array}$$

$$\begin{pmatrix} \tau_{obs1} - \tau_{theory1} \\ \tau_{obs2} - \tau_{theory2} \\ \tau_{obs3} - \tau_{theory3} \\ \bullet \\ \bullet \\ \bullet \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{S}_1/c, fm(El_{1,x}), -fm(El_{1,y}), 1, (t_1 - t_0) \\ \vec{S}_2/c, fm(El_{2,x}), -fm(El_{2,y}), 1, (t_2 - t_0) \\ \vec{S}_3/c, fm(El_{3,x}), -fm(El_{3,y}), 1, (t_3 - t_0) \\ \bullet \\ \bullet \\ \bullet \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta \vec{B} \\ \delta \tau_x \\ \delta \tau_x \\ \tau_0 \\ \dot{\tau} \end{pmatrix}$$

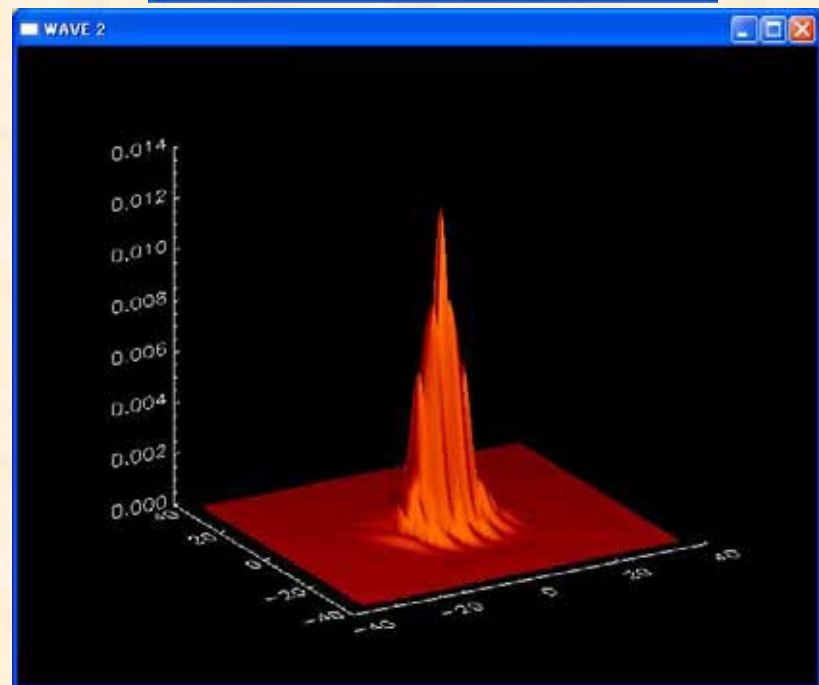
VLBIの観測量(電波天文)



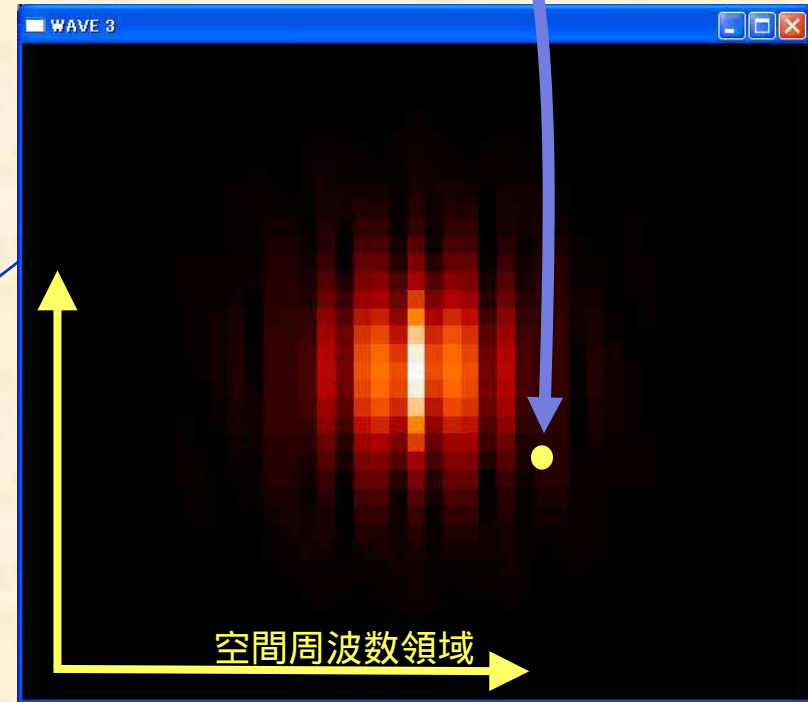
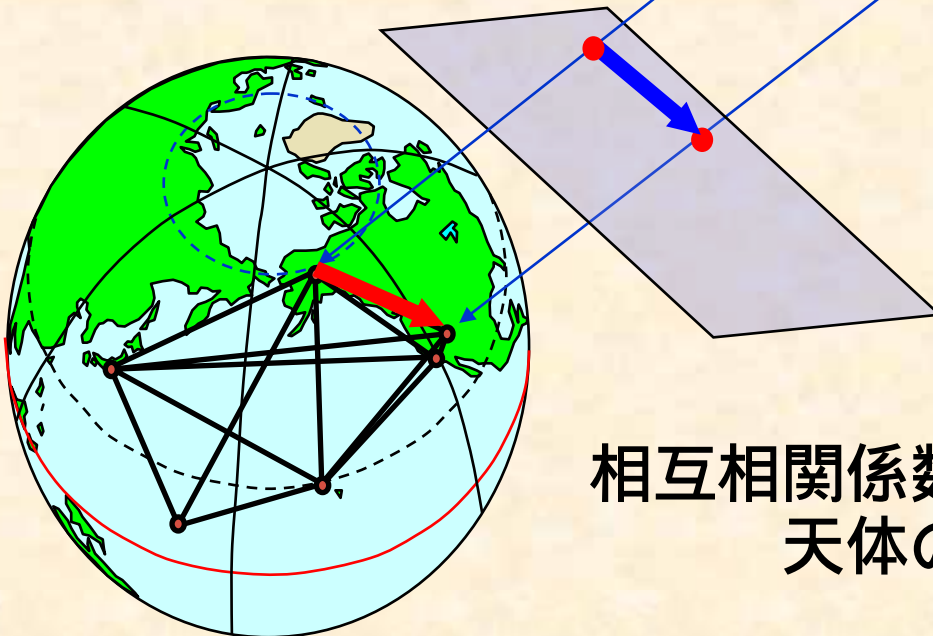
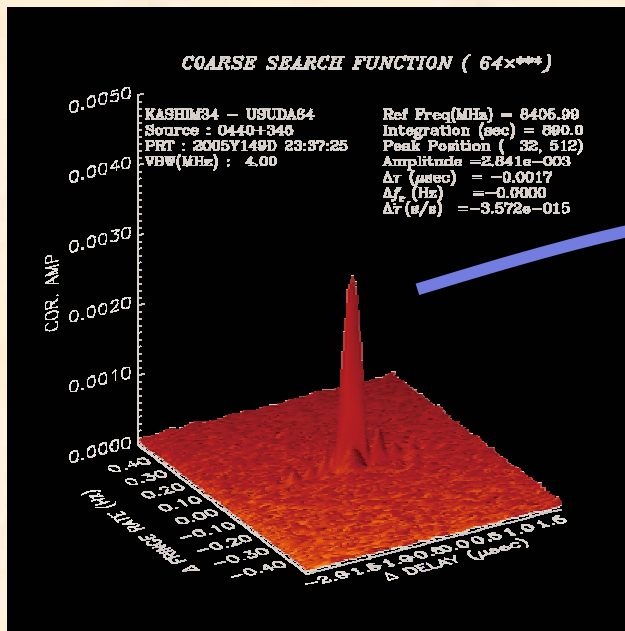
空間領域
と
空間周波数
領域



Fourier
変換

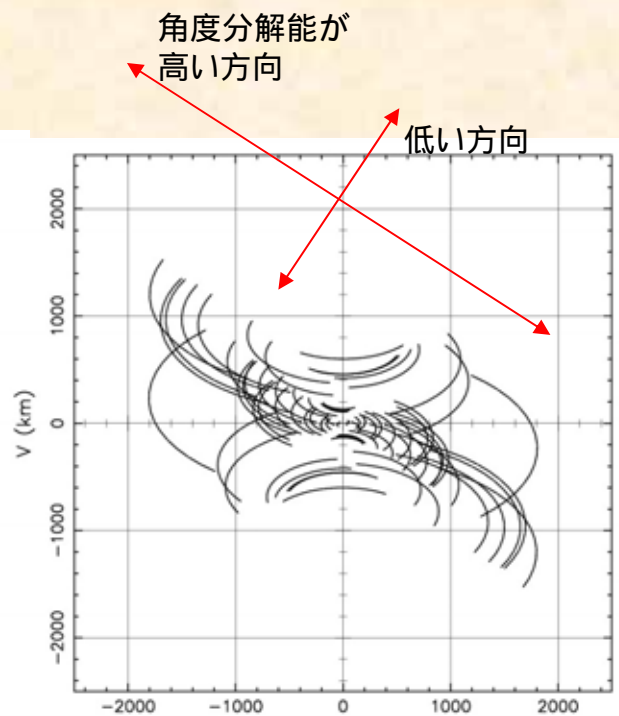
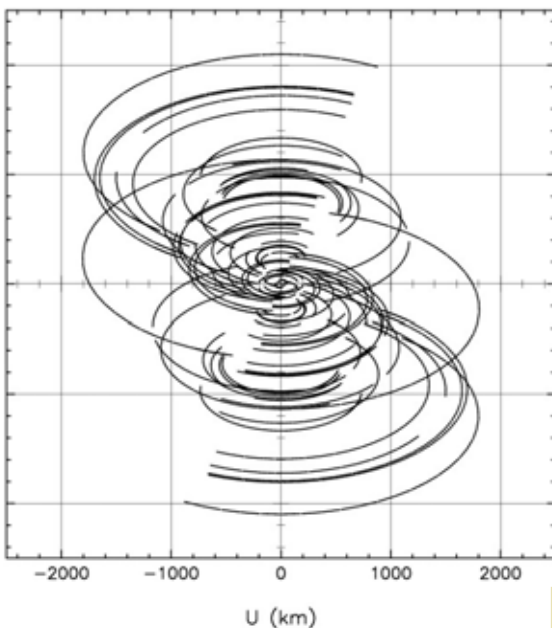
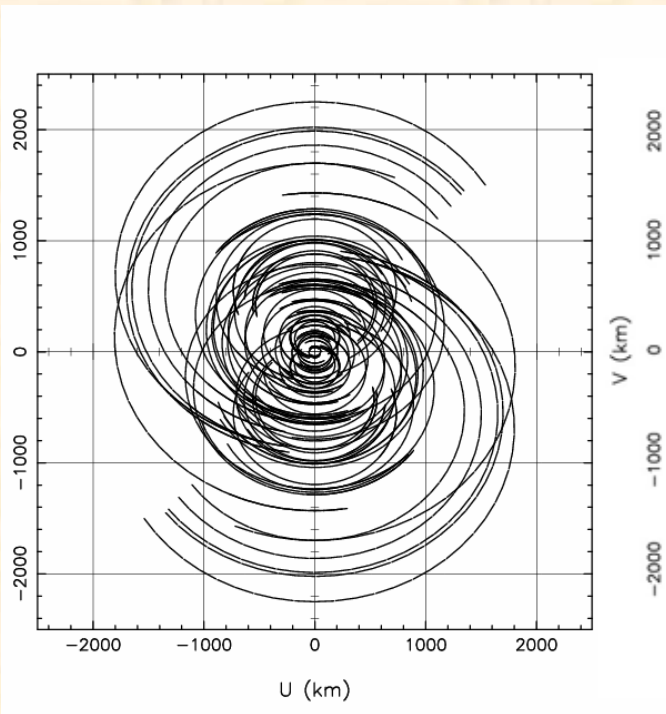


VLBIの観測量 (電波天文)

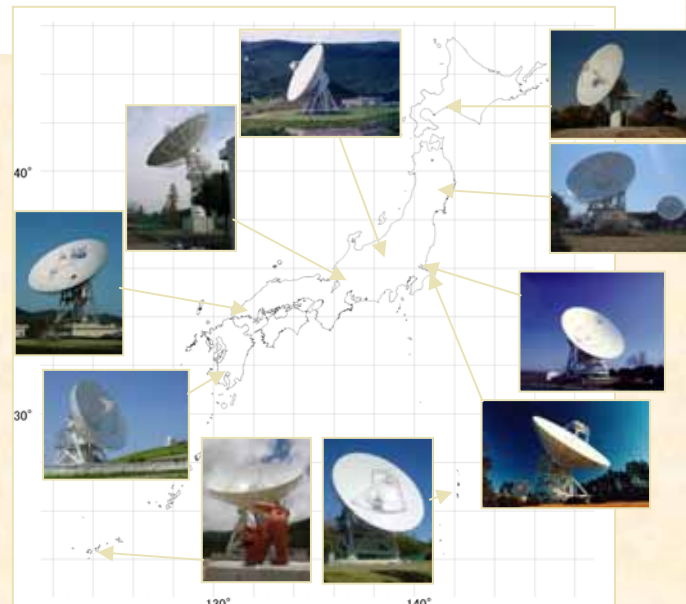


相互相関係数 =
天体の輝度分布の空間周波数成分

u-v 平面の例



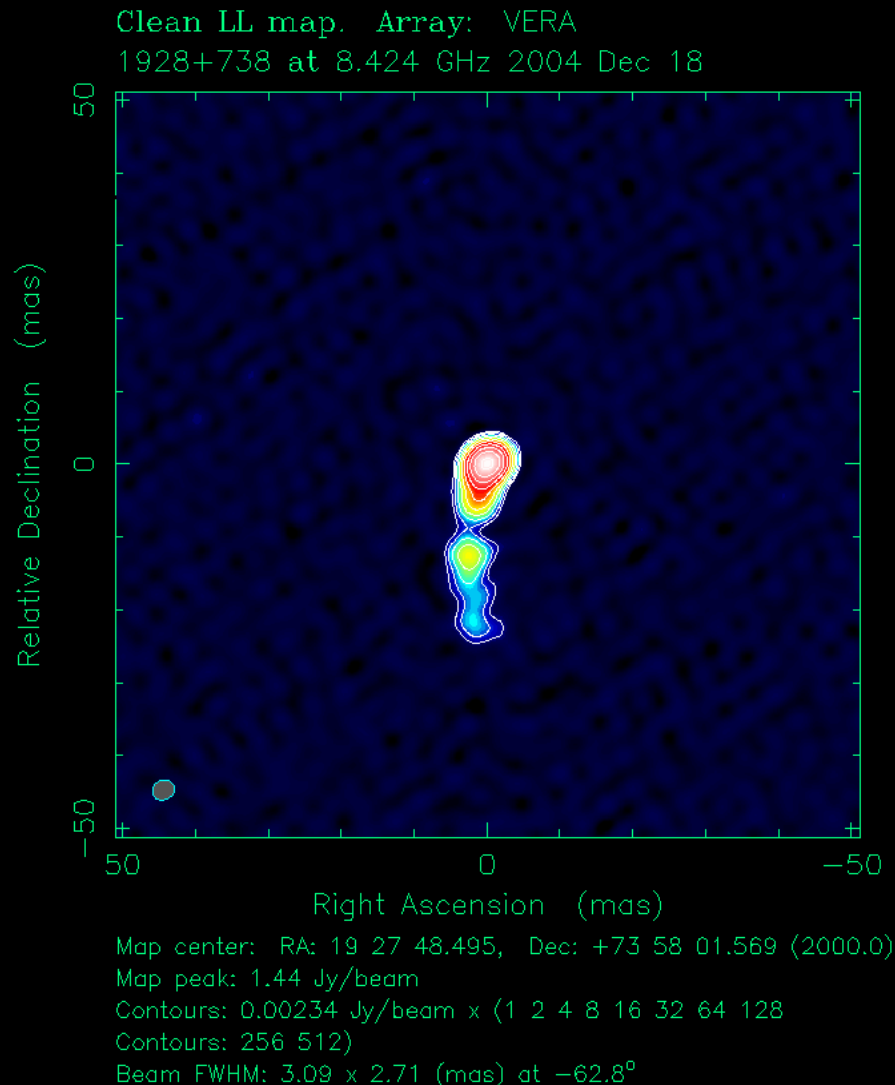
- ◆ 大学VLBI連携観測網(右図)
 - 9局の望遠鏡による観測をシミュレーション
 - 観測時間16時間を仮定
 - 左: 赤緯 + 60 度、中: + 30 度、右: - 30 度



V L B Iの観測結果

- ◆ JVN 8GHz観測
 - 天体: 1928+738 (クエーサー)
- ◆ 合成ビームサイズ
 - 3.09×2.71 milli-arcsec
 $= 1.45 \times 10^{-8}$ rad

V L B I観測
天文観測システムで
最も高い角度分解能





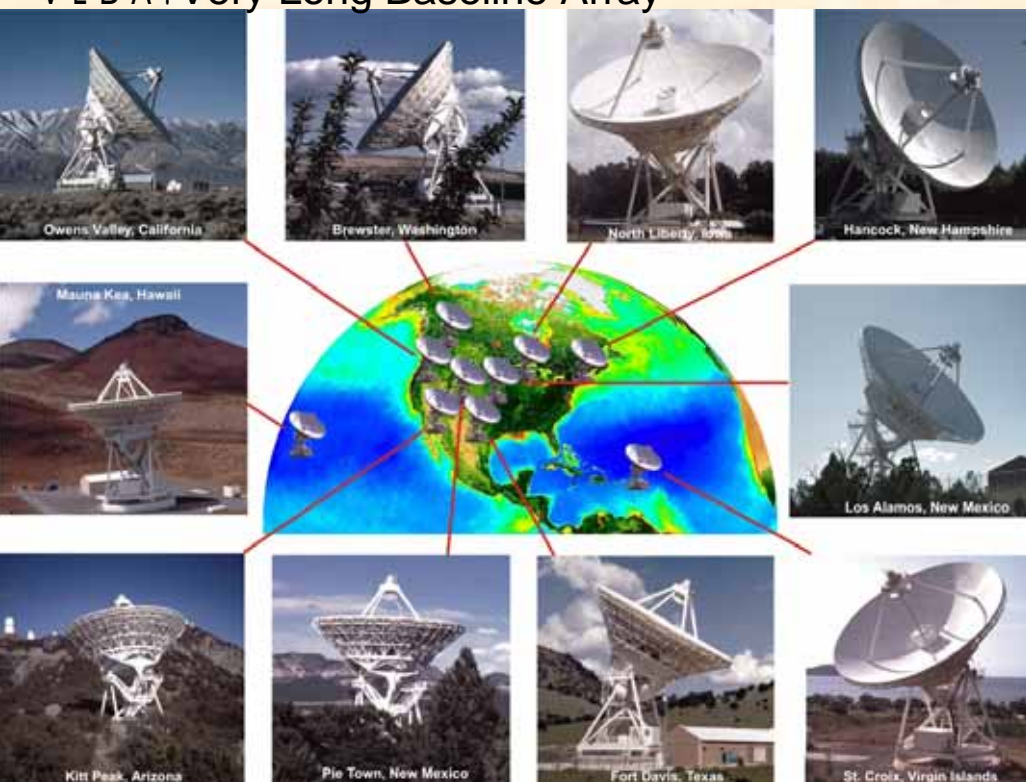
EVN:ヨーロッパVLBIネットワーク

EVN Members MAG 03/2002

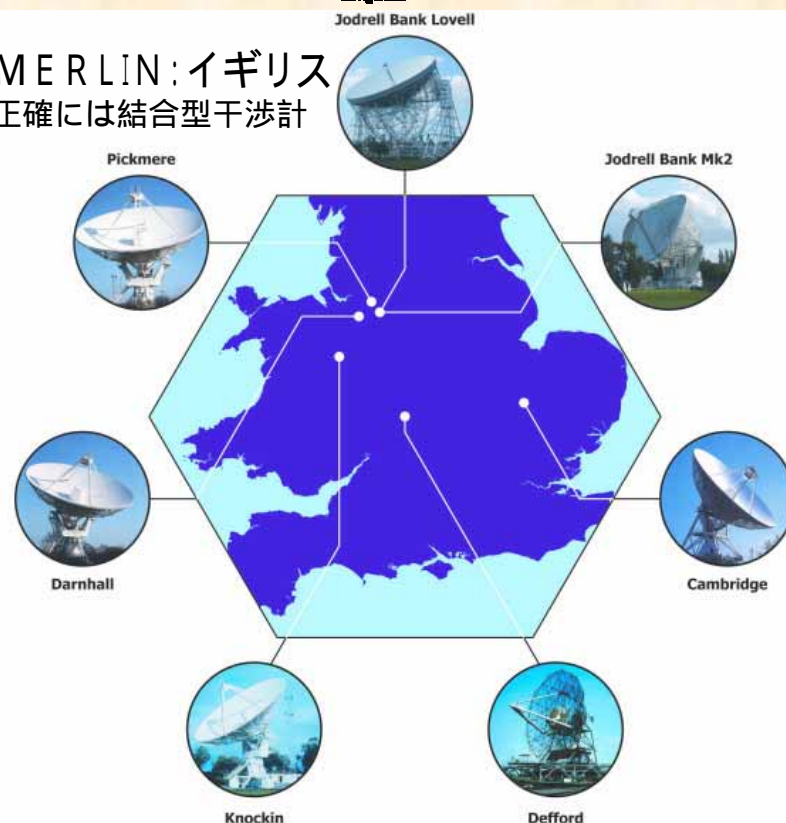


LBA: オーストラリア

VLBA: Very Long Baseline Array



MERLIN: イギリス
正確には結合型干渉計



JVN: Japanese VLBI Network

◆ 協力機関

- 国立天文台
- 北海道大学
- 岐阜大学
- 山口大学
- 鹿児島大学
- JAXA
- NICT
- GSI

◆ 基線

- 10局45基線
- 50 - 2500 km

◆ 周波数

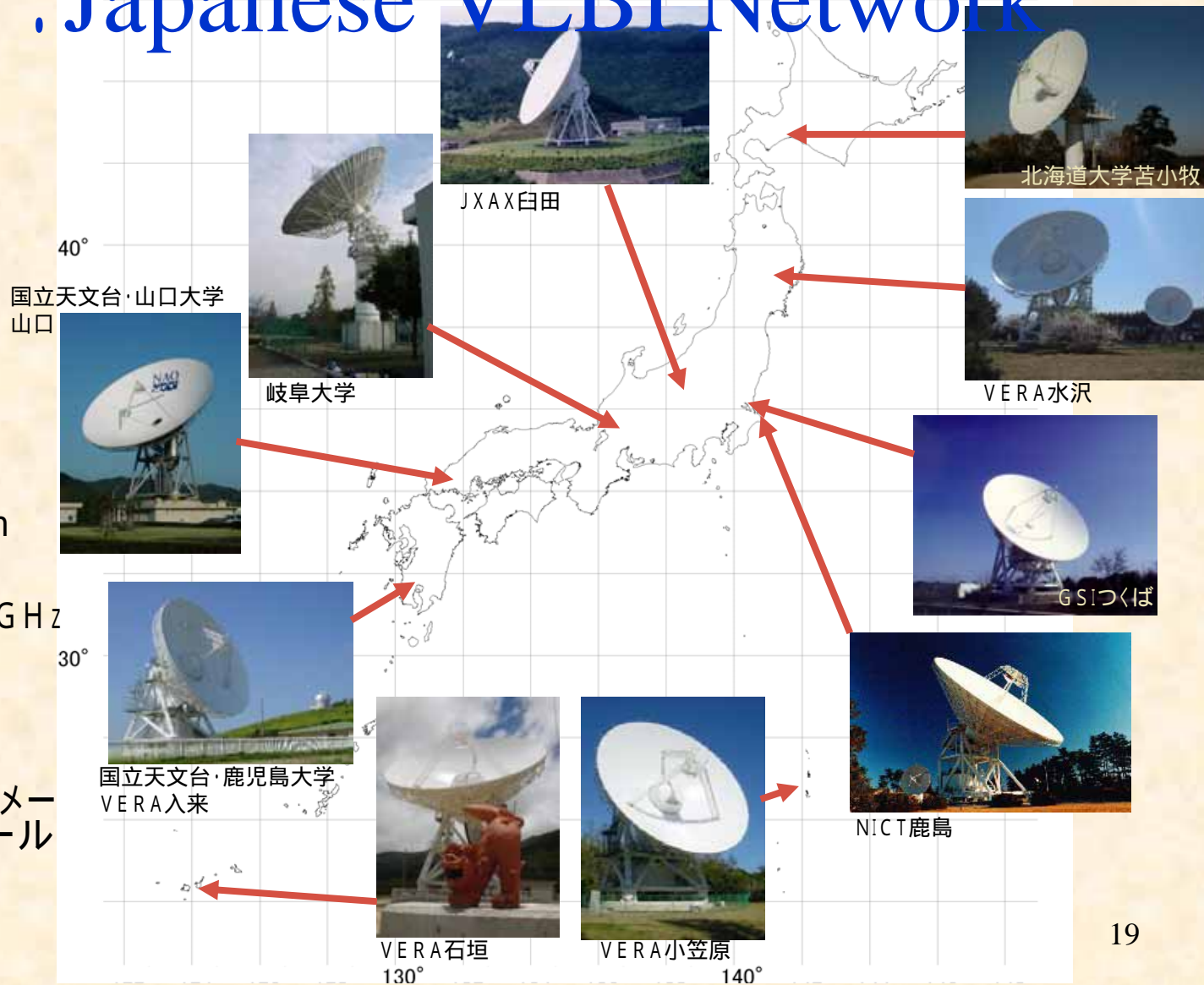
- 8 / 22 / 6.7 GHz

◆ 角度分解能

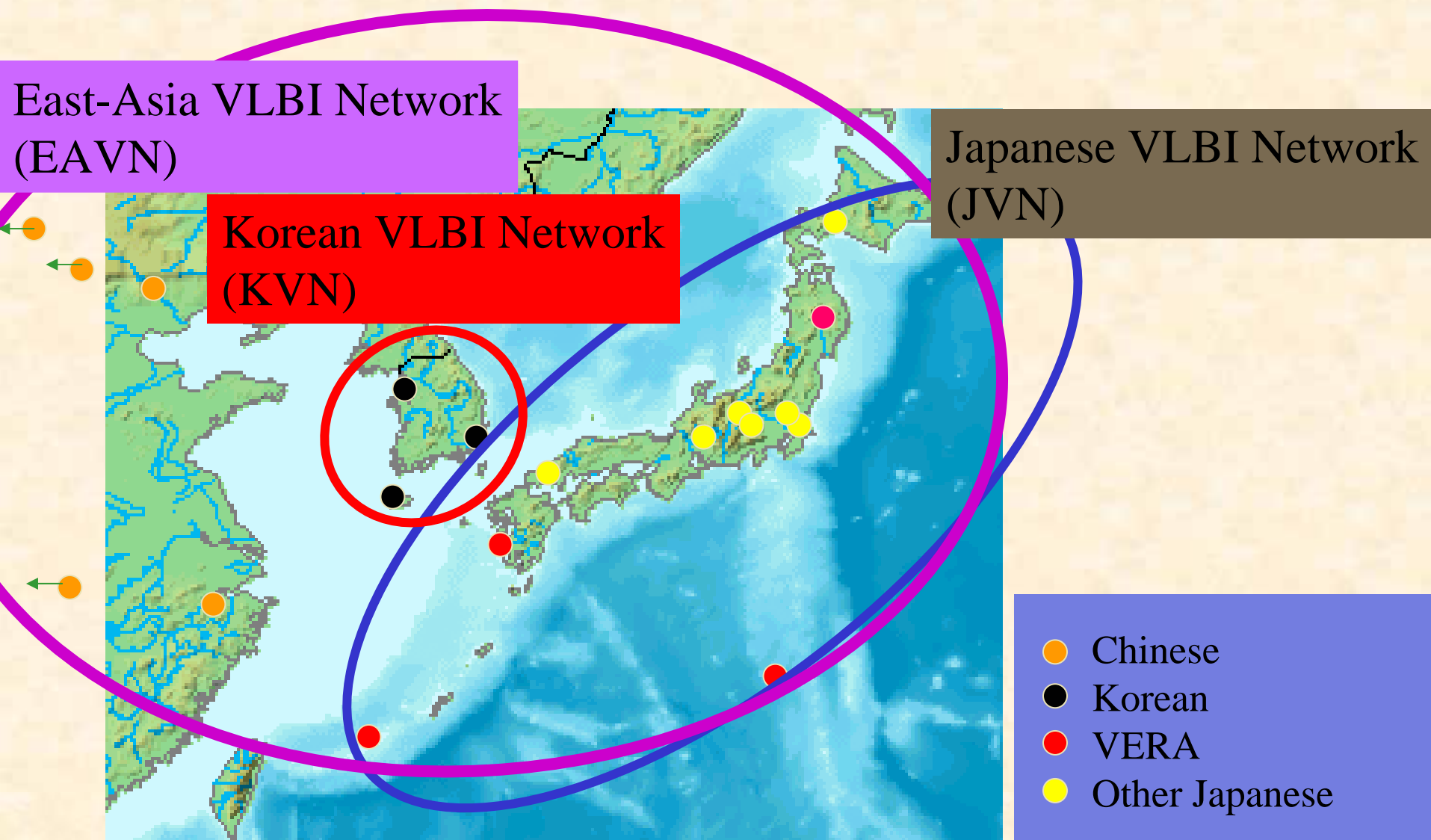
- 3 mas @ 8GHz

◆ 観測対象

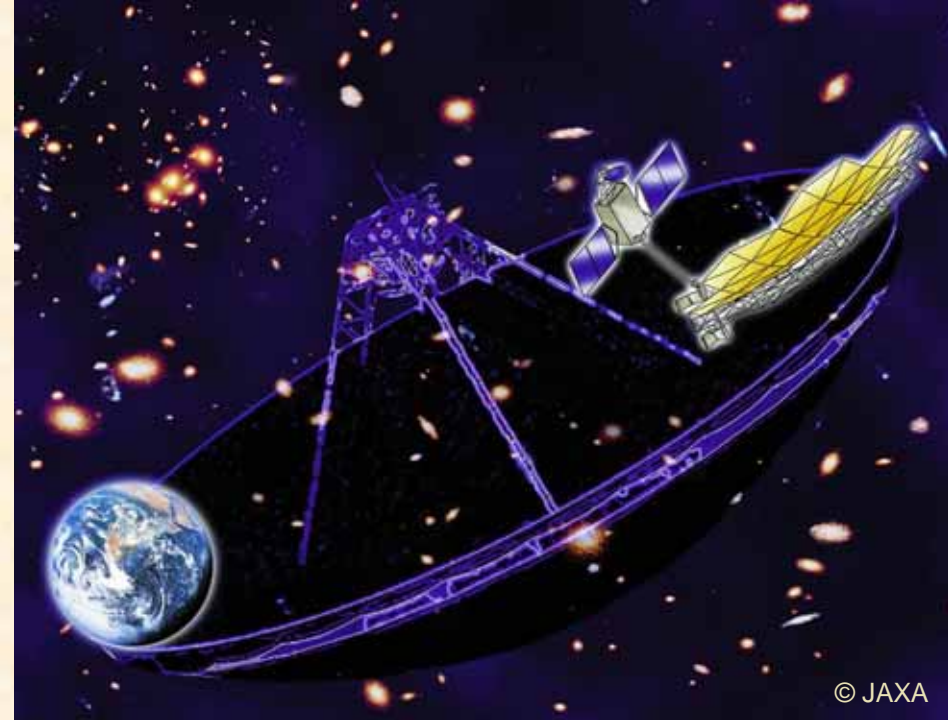
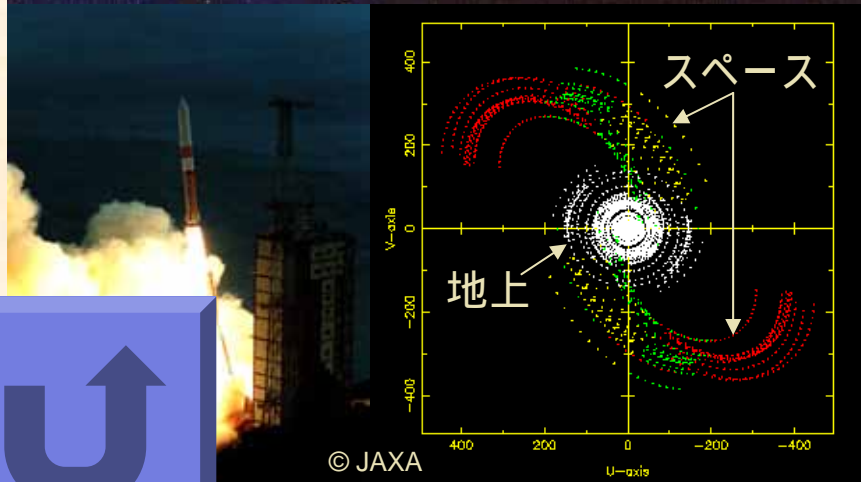
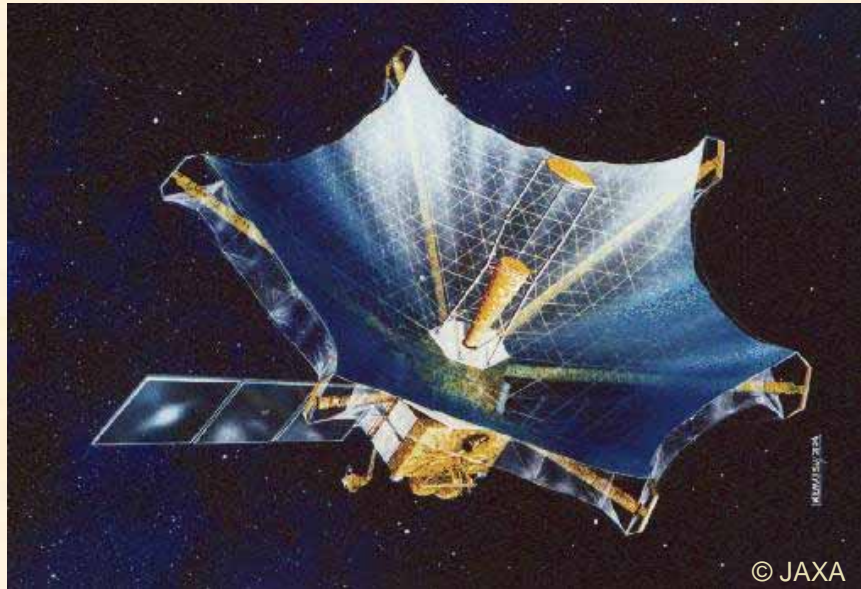
- クエーサー、水メーザ天体、メタノールメーザ天体



East-Asian VLBI Network (将来計画)



スペースVLBI

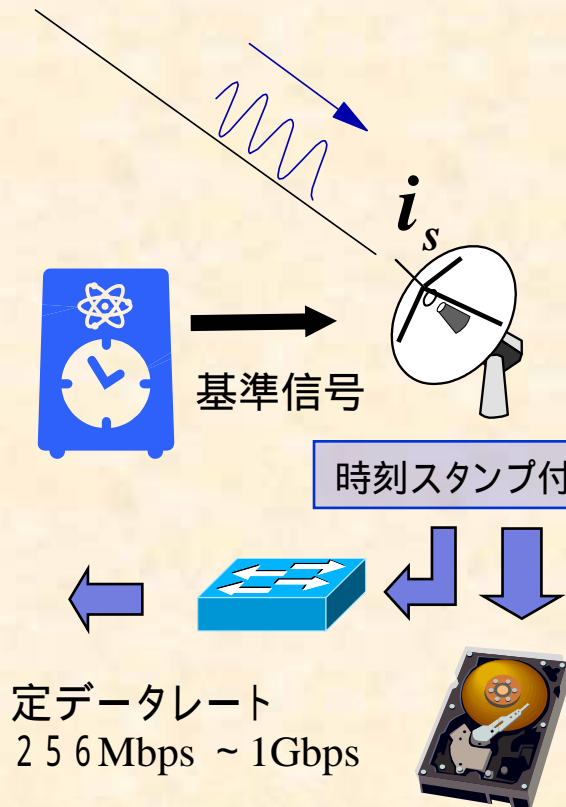


- ◆ VSOP
 - 1997年2月に打ち上げた人工衛星「はるか」(左上)を使った世界初のスペースVLBI観測
 - M-Vロケットで打ち上げの瞬間(左下)
 - 改善されたu-vカバレッジ(左)
- ◆ VSOP-2
 - 2012年打ち上げ予定、世界で2番目のスペースVLBI観測(上)
- ◆ この分野で日本は世界をリード

VLBI観測と通信ネットワーク

VLBI観測の成立条件 (ネットワークへの要求)

- 高い安定度を持つ原子時計
- 可干渉性(位相情報)を保存したデータ転送
 - エラーレートは高めでも構わないがビットメイク、ビットスリップは許容できない。
- 一定データレートでのデータ生産を漏らさず記録・伝送すること
 - $1.e-3$ 程度のエラーがランダムに生じても大丈夫。バーストエラーはダメ
 - 伝送データレートの観測途中での変更は不可
- データレート
 - 64 Mbps ~ 256 Mbps、1 Gbps
 - 将来的に数Gbps

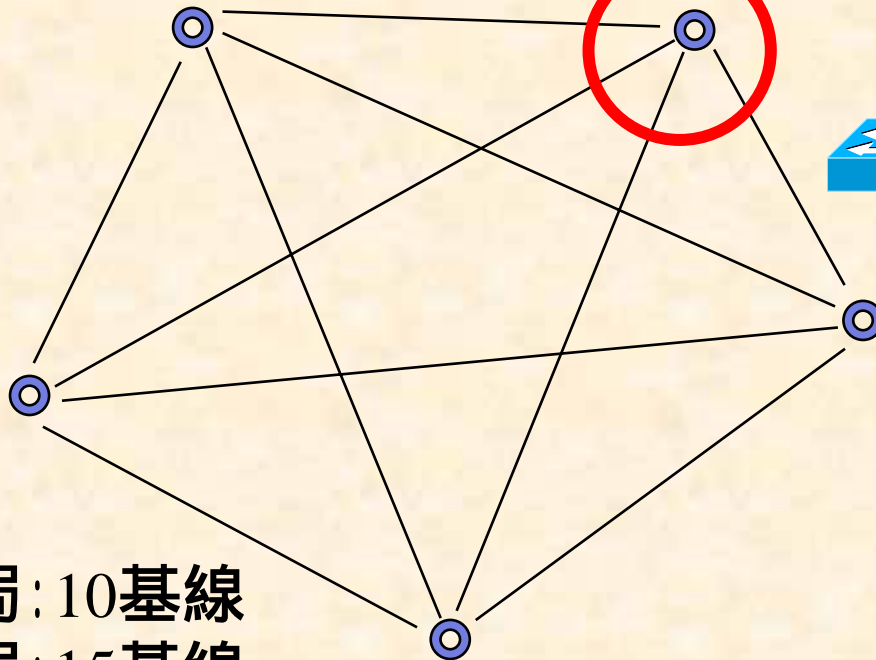


VLBIのデータ処理の流れ

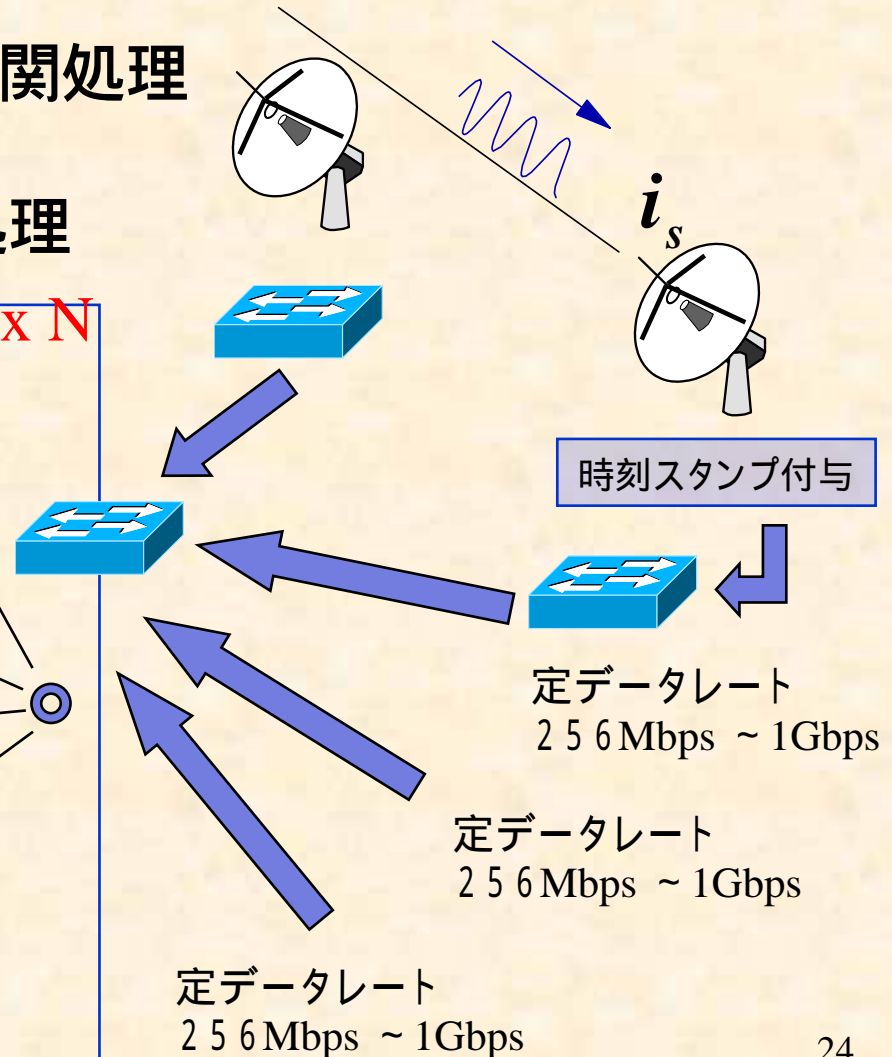
観測局の組み合わせの数分の相関処理
観測局数分のフーリエ変換
局組み合わせの数分の積・和処理

相関処理センター

256Mbps x N



5局:10基線
6局:15基線



VLBIにとってe-VLBIとは？

- 高感度の観測
 - 広帯域、高データレートを要求
- 高い空間分解能 = 長い基線
 - 長距離伝送を要求: 空間分解能 $\propto 1/(\text{基線長})$
- 位相情報を保存したデータ
 - とびのない連続時系列データを要求
 - エラーレートの許容範囲は比較的ゆるい ($\sim 1\text{E-}3$)
- データ処理の自動化、リアルタイム処理
 - 迅速解、高頻度観測
 - 長時間連続観測—観測感度向上

電波望遠鏡の感度

256Mbps X 1 日
数TByte/Station

電波星の受信電力～

携帯電話 / 10億 / 10億

$$P = k_B T = -181 \text{dBm} / \text{Hz} \\ = -121 \text{dBm} / \text{MHz}$$

- ◆ システム雑音温度～60K

- 携帯電話電力密度～

0dBm/cm²

- 34m口径で受信する電力密度～

-188dBm/cm²

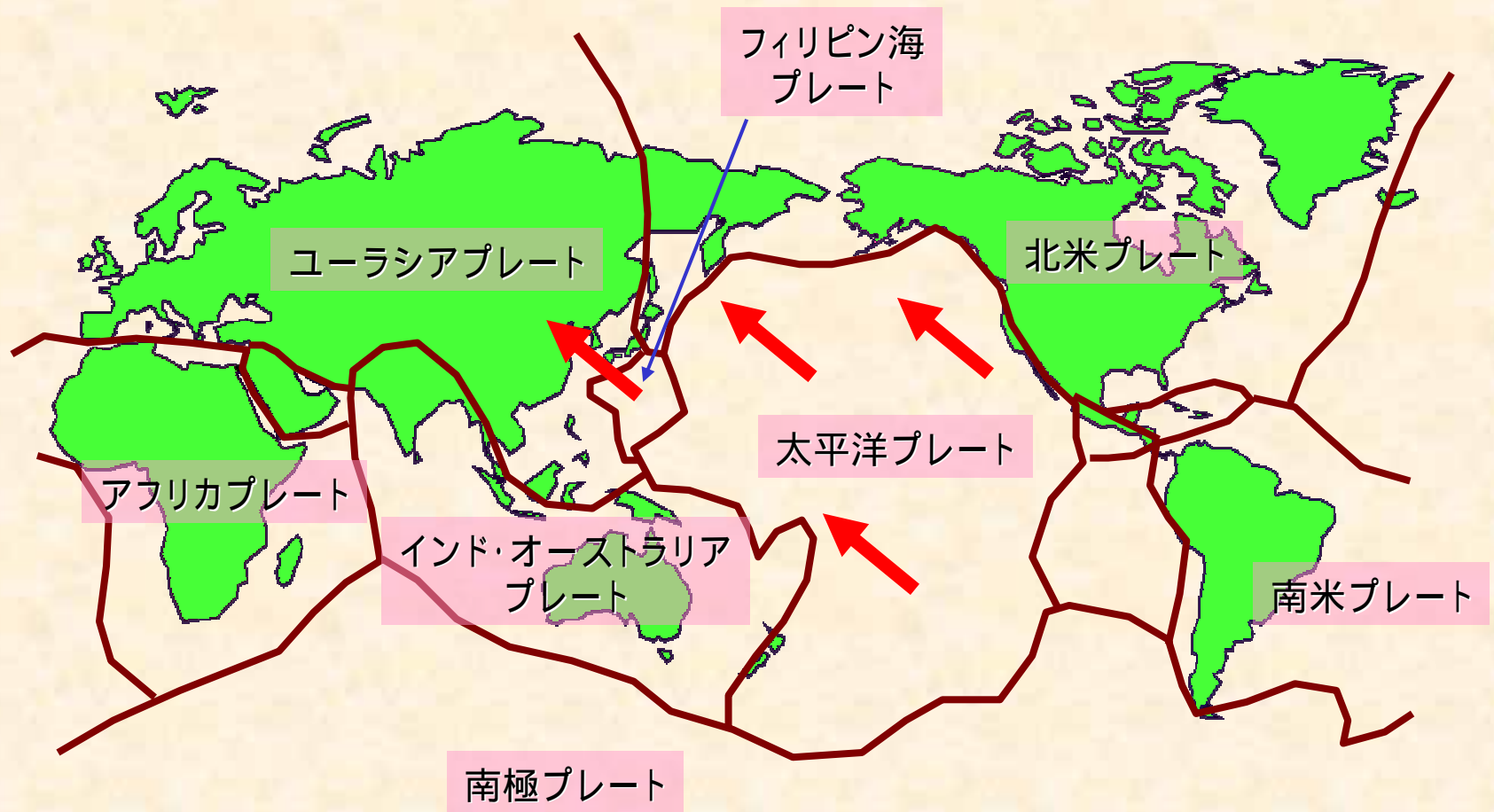
- ◆ 受信感度～ $SNR \propto \frac{S}{T_{sys}} \sqrt{(\text{帯域幅}) \times (\text{積分時間})}$

VLBI観測のこれまで (NICT)

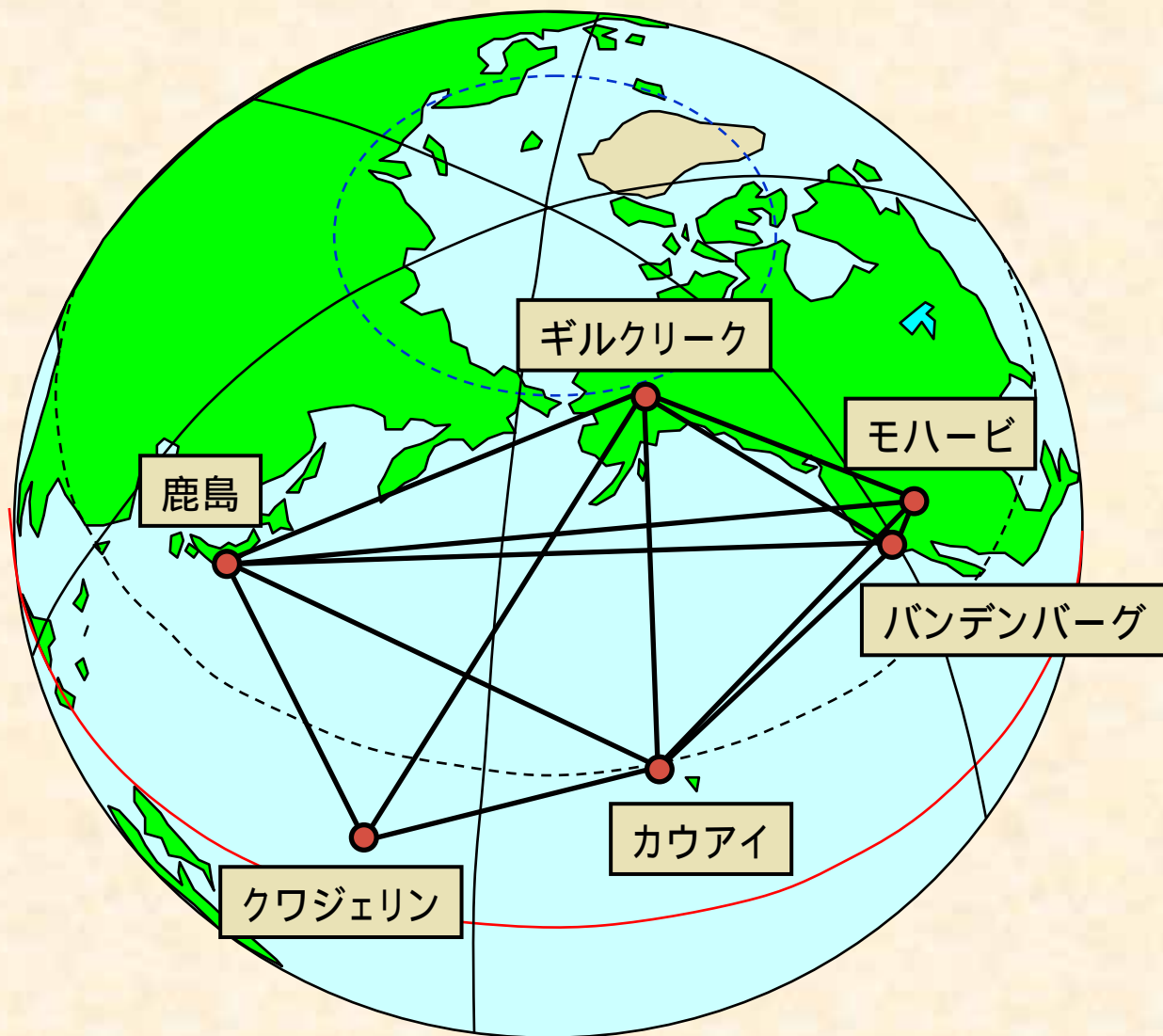
- ◆ 日本におけるVLBI技術のパイオニアとして
 - プレート運動の検出・地球回転計測
 - 首都圏地殻変動観測プロジェクト(KSP)
 - リアルタイムVLBI(ATM)の実現
 - 三宅島噴火時の地殻変動検出
 - 新しいVLBI観測システムの開発
 - 高速サンプラ、IP-VLBIシステムの開発
 - PCインタフェース、ソフトウェア相関器の開発
- ◆ E-VLBIの応用
 - Ultra-Rapid UT1計測、 宇宙飛翔体の軌道計測



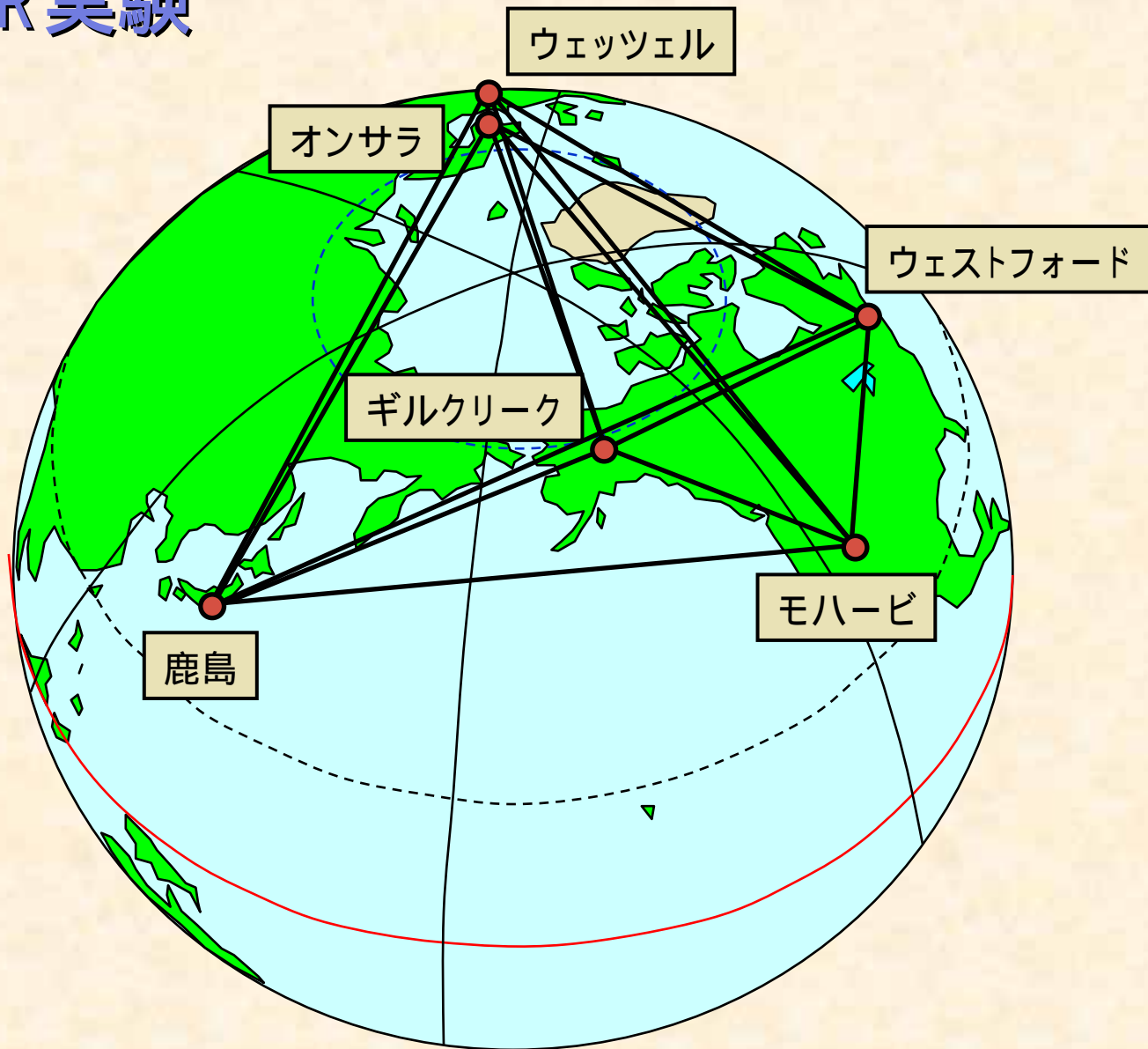
世界のプレート



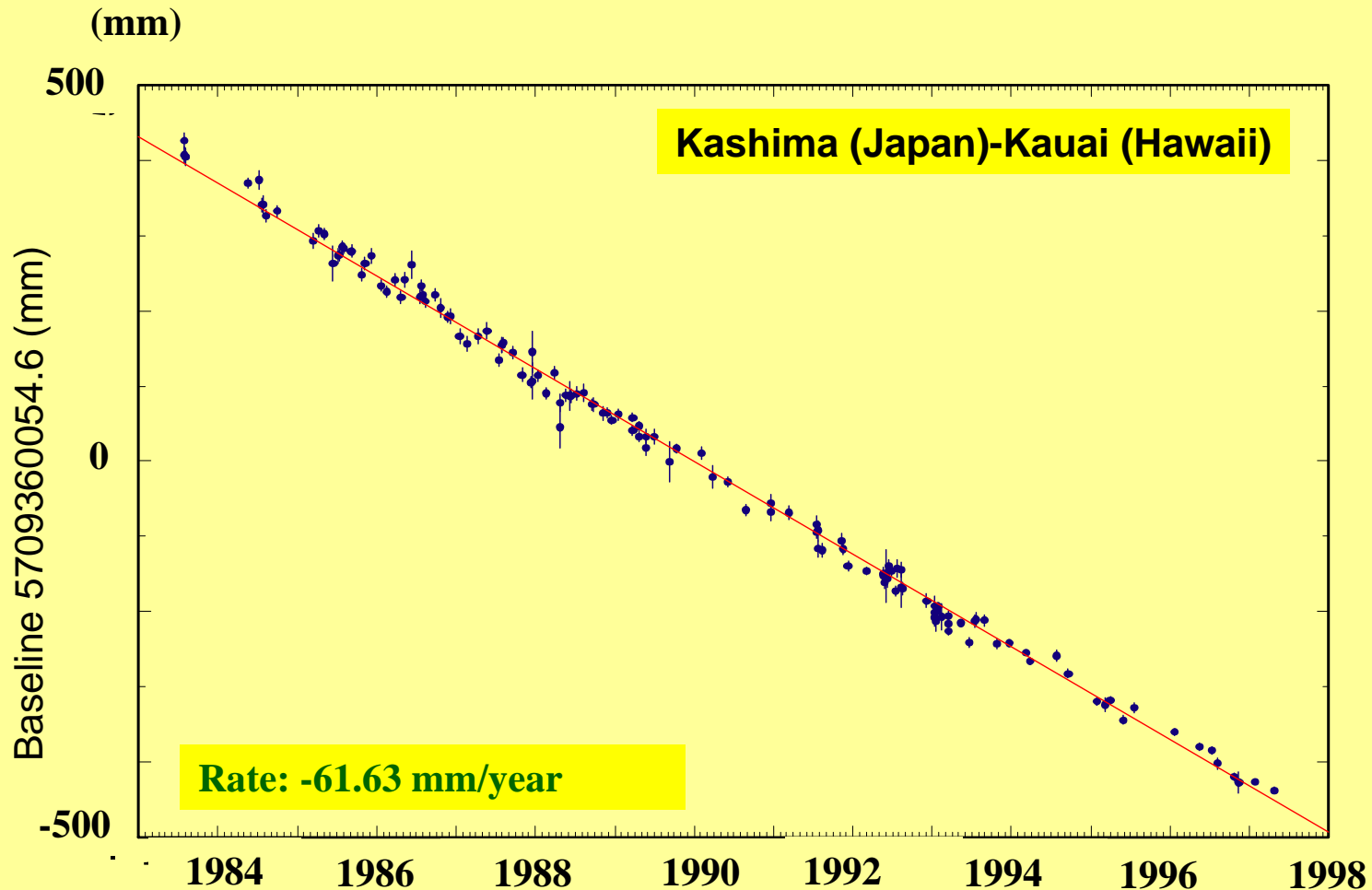
W & EPAC 実験



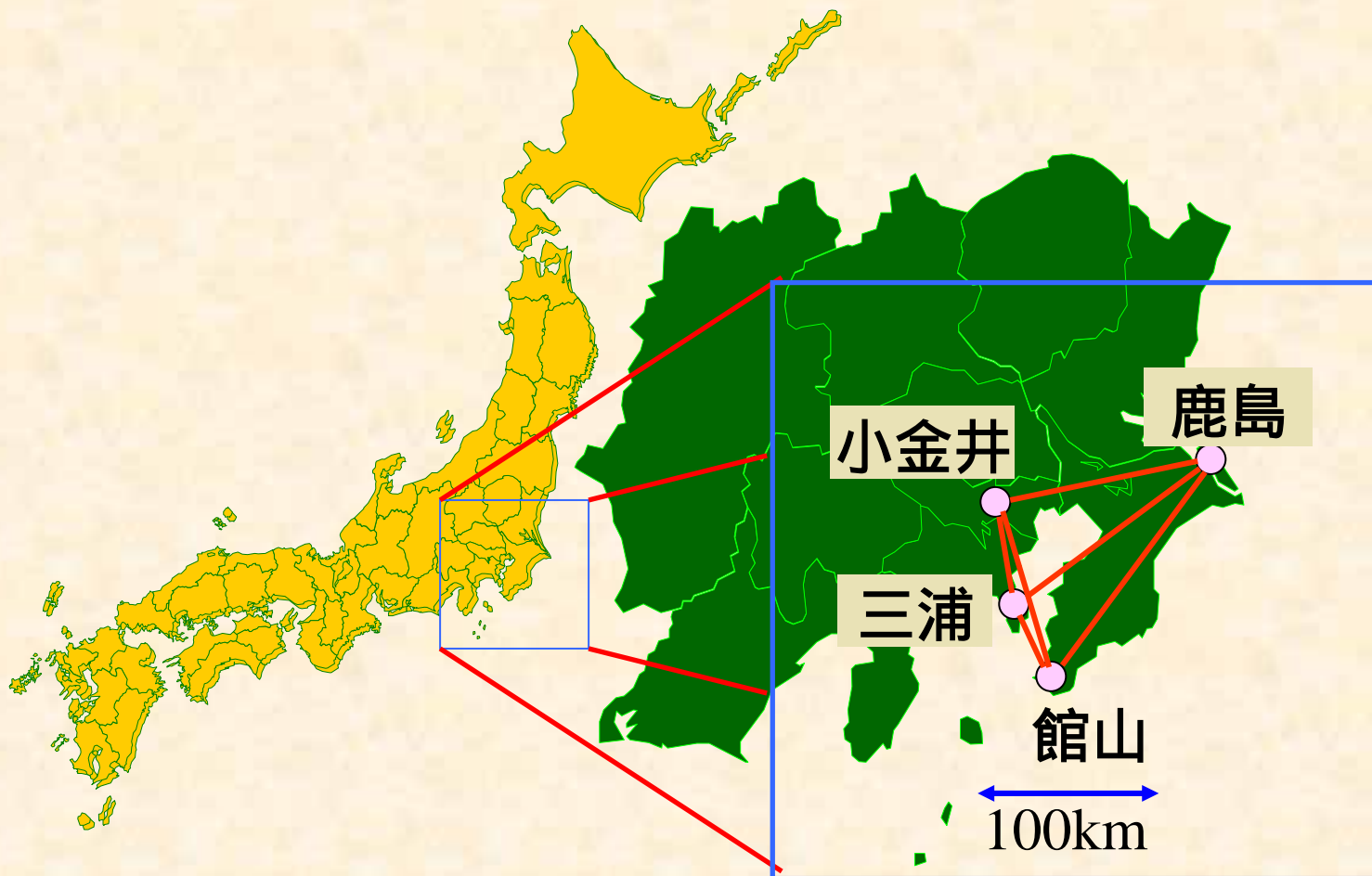
POLAR実験



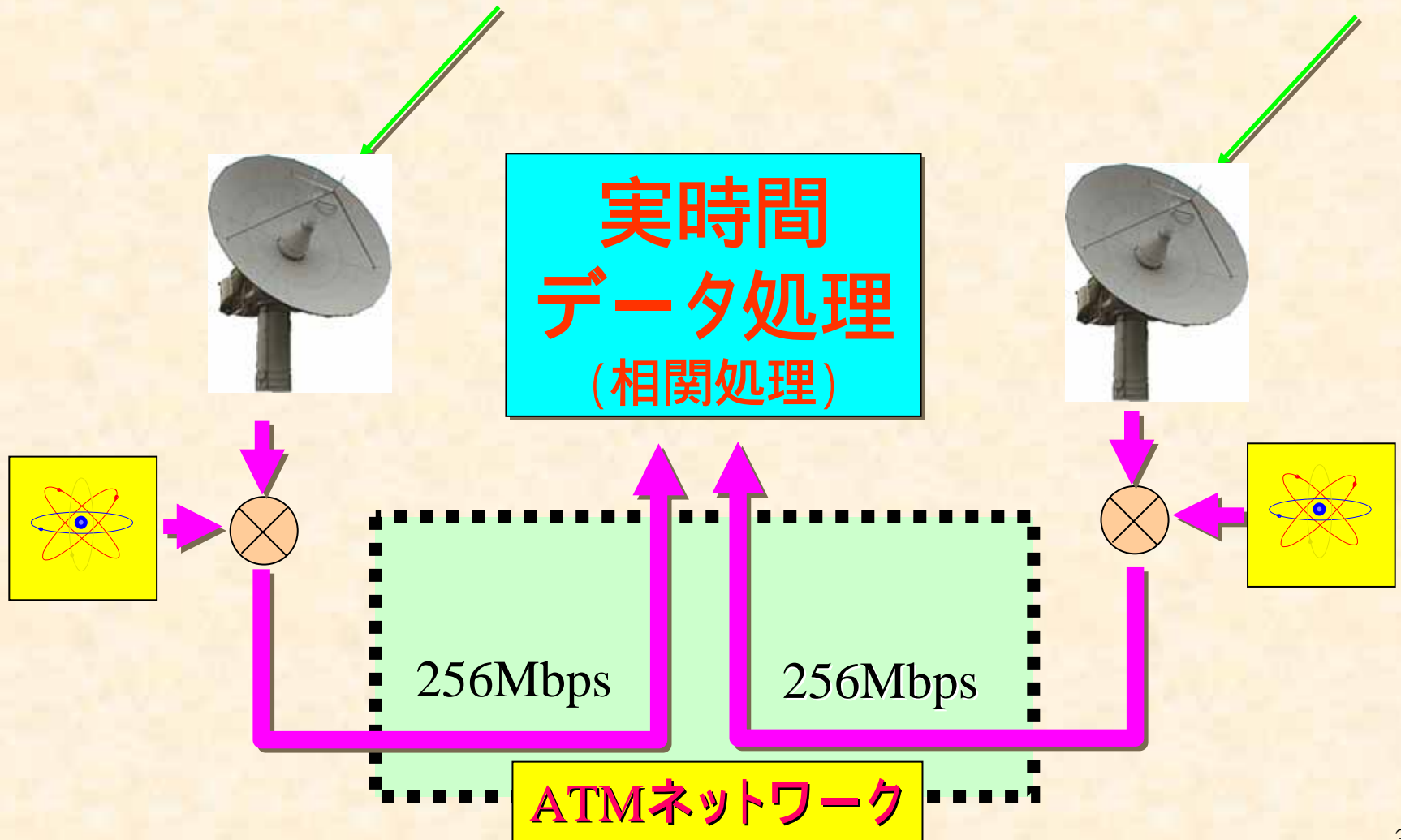
鹿島ーカウアイ(ハワイ)の基線長変化



KSP - VLBI網



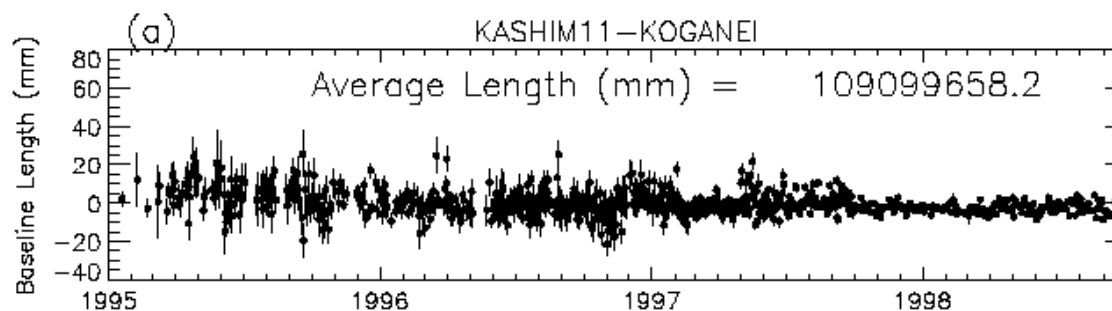
実時間VLBI



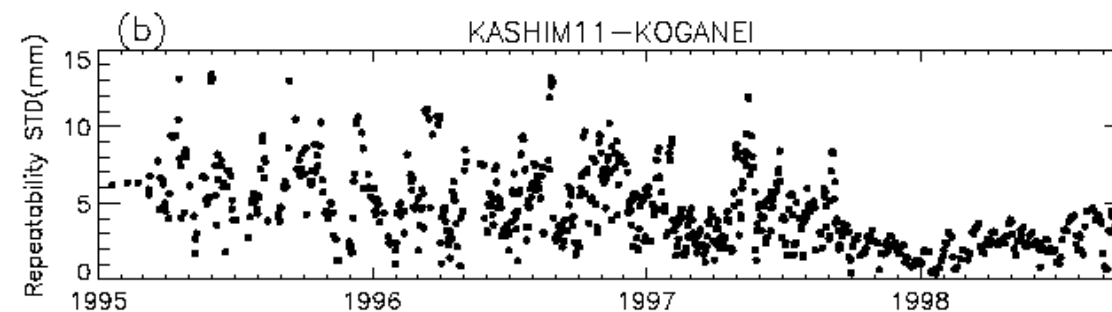
256Mbps : 1秒間に新聞紙約1200ページ分(約2ヶ月分)の情報

測位精度の向上

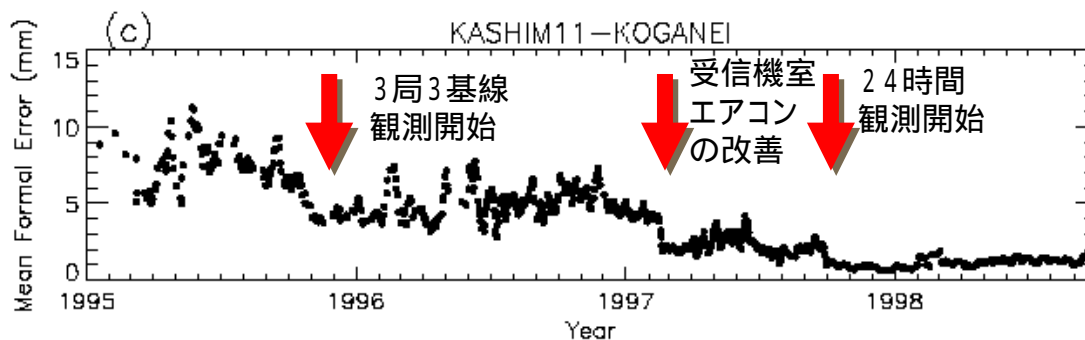
基線長

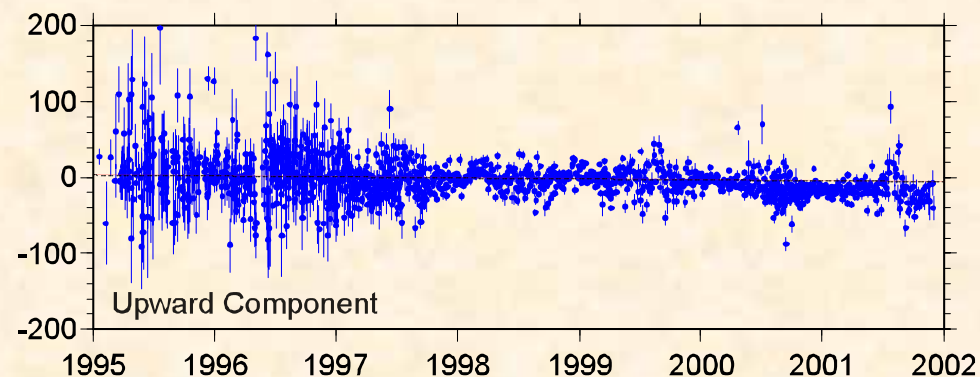
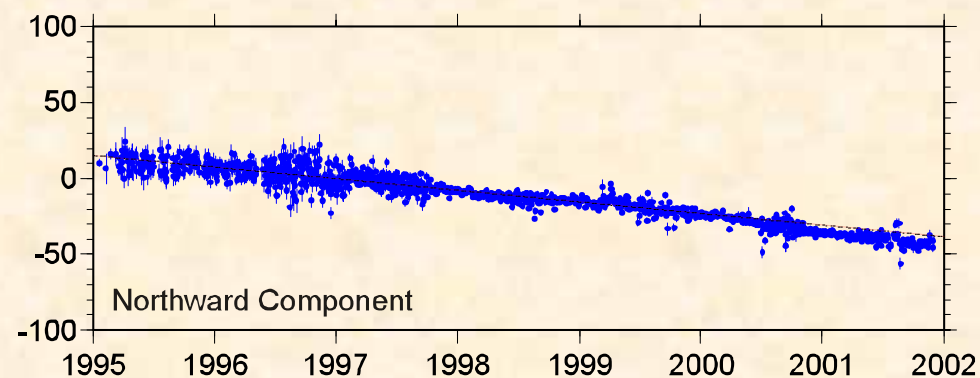
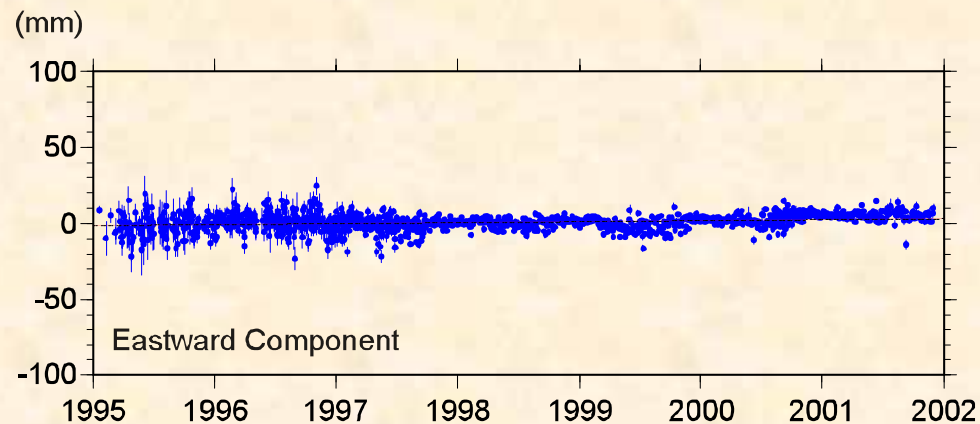


再現性



内部誤差





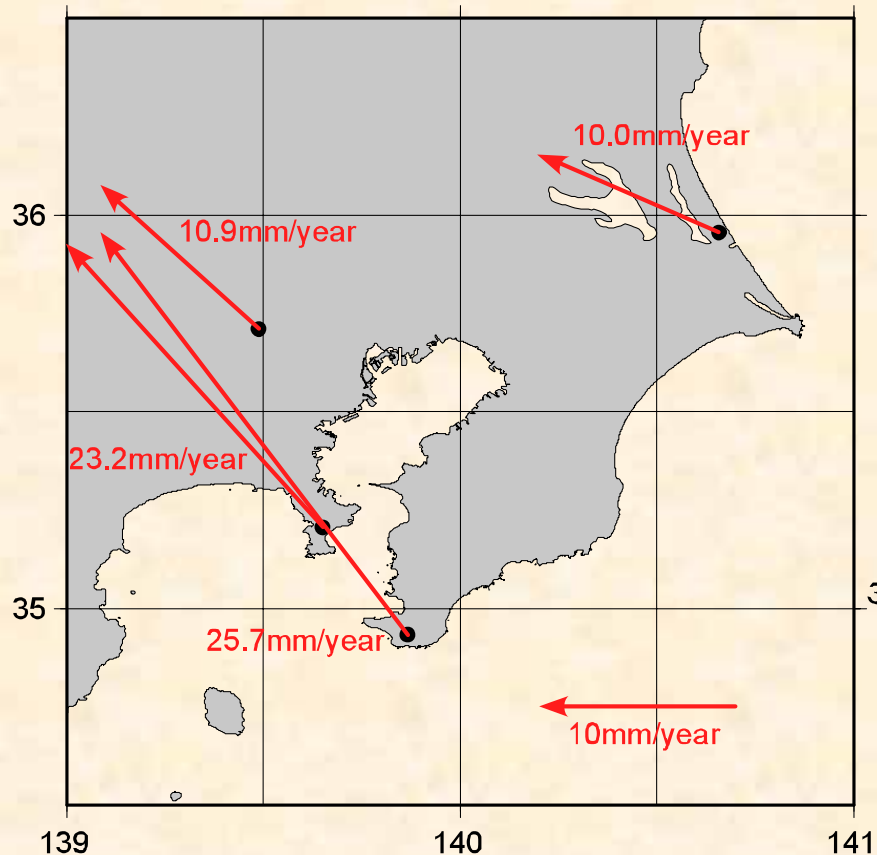
Year

局位置推定値の再現性(mm)

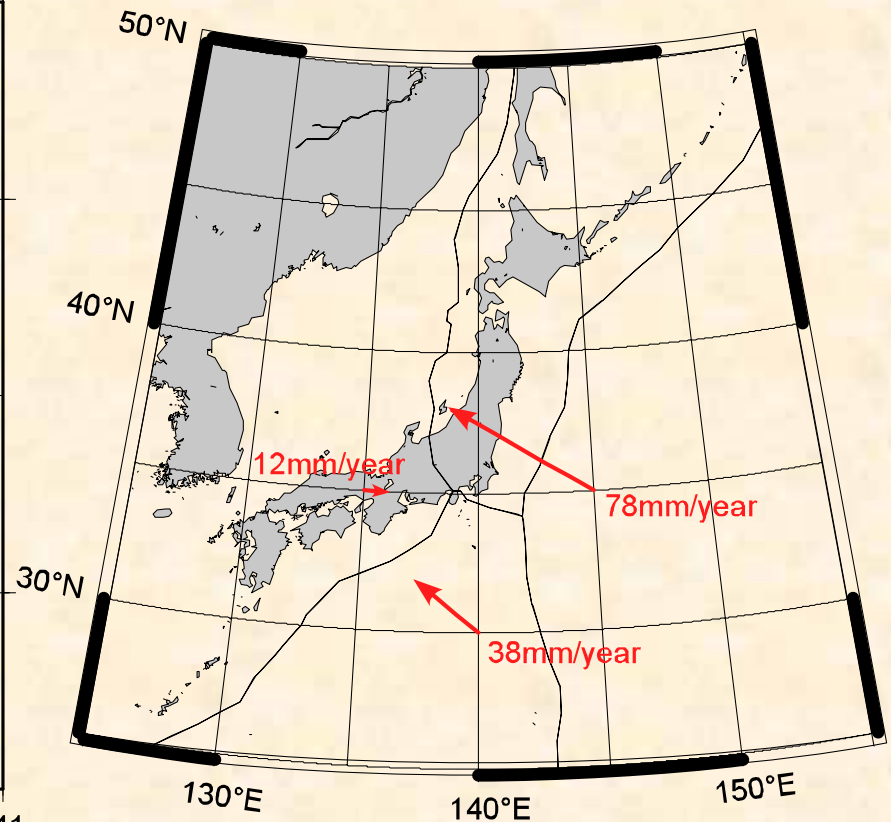
1997.9.30-1998.11.14

| | 東西 | 南北 | 鉛直 |
|-----|-----|-----|------|
| 小金井 | 2.2 | 2.0 | 10.7 |
| 三浦 | 2.3 | 2.5 | 12.1 |
| 館山 | 2.5 | 2.4 | 11.1 |

静穏時 (~2000.5) の局速度とプレート運動



北米プレートに対する鹿嶋局の動きを各局の局速度に加えたときのKSP観測局の動き



プレート運動モデル (Nuvel-1A + Seno model) による北米プレートに対する周辺プレートの動き

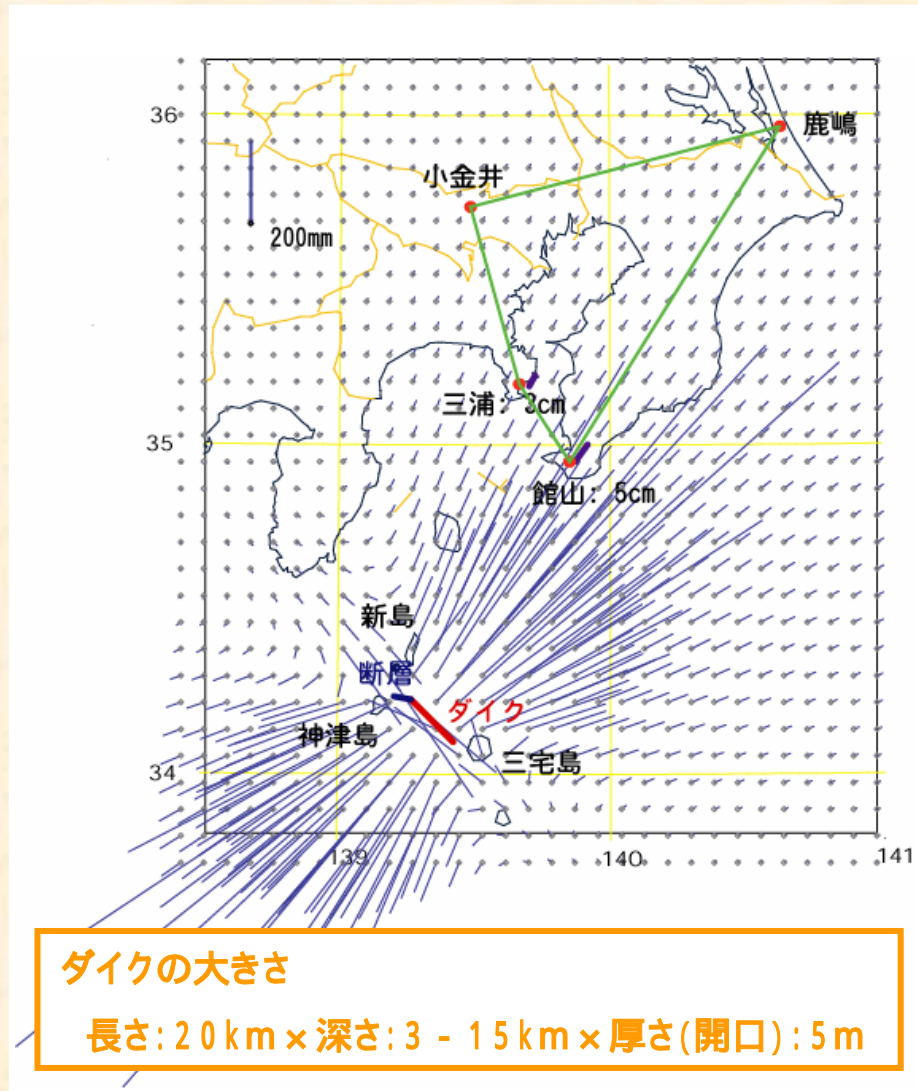
神津島東方海域の地下での岩脈状マグマ活動 が南関東の広域地殻変動を誘起

- 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.)

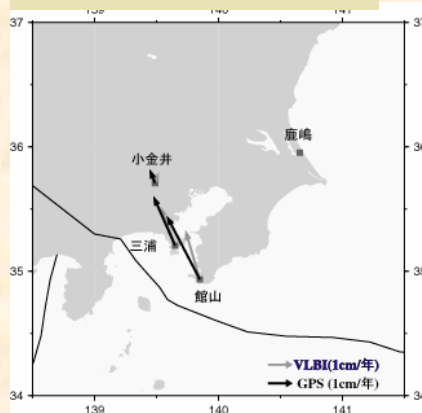
名古屋大学モデル準拠

気象研究所MICAP - Gソフト使用

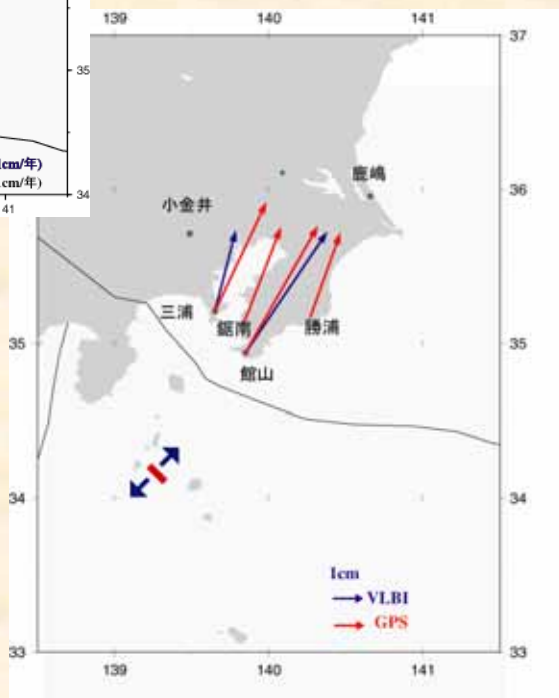


首都圏広域地殻変動観測網で捉えた伊豆諸島地震・火山活動の影響

H12年6月26日までの
観測局年間移動速度
(基準: 鹿嶋)



H12年6月26日～9月15日ま
での観測局移動(基準: 鹿嶋)
(GPSは国土地理院観測点)

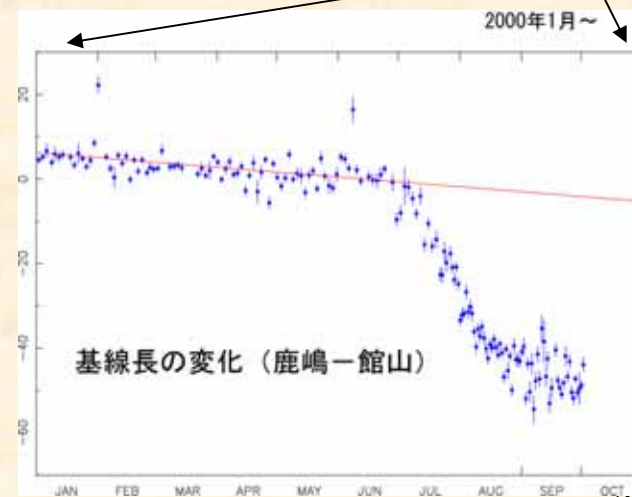
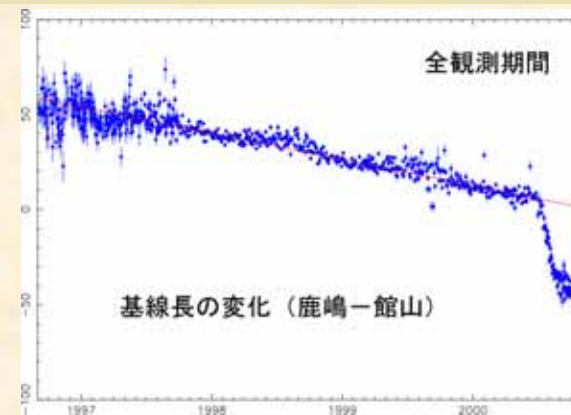


6月末以降、首都圏
観測網の観測局移動
ベクトルは、一変した。

通信総合研究所

首都圏広域地殻変動観測推進本部

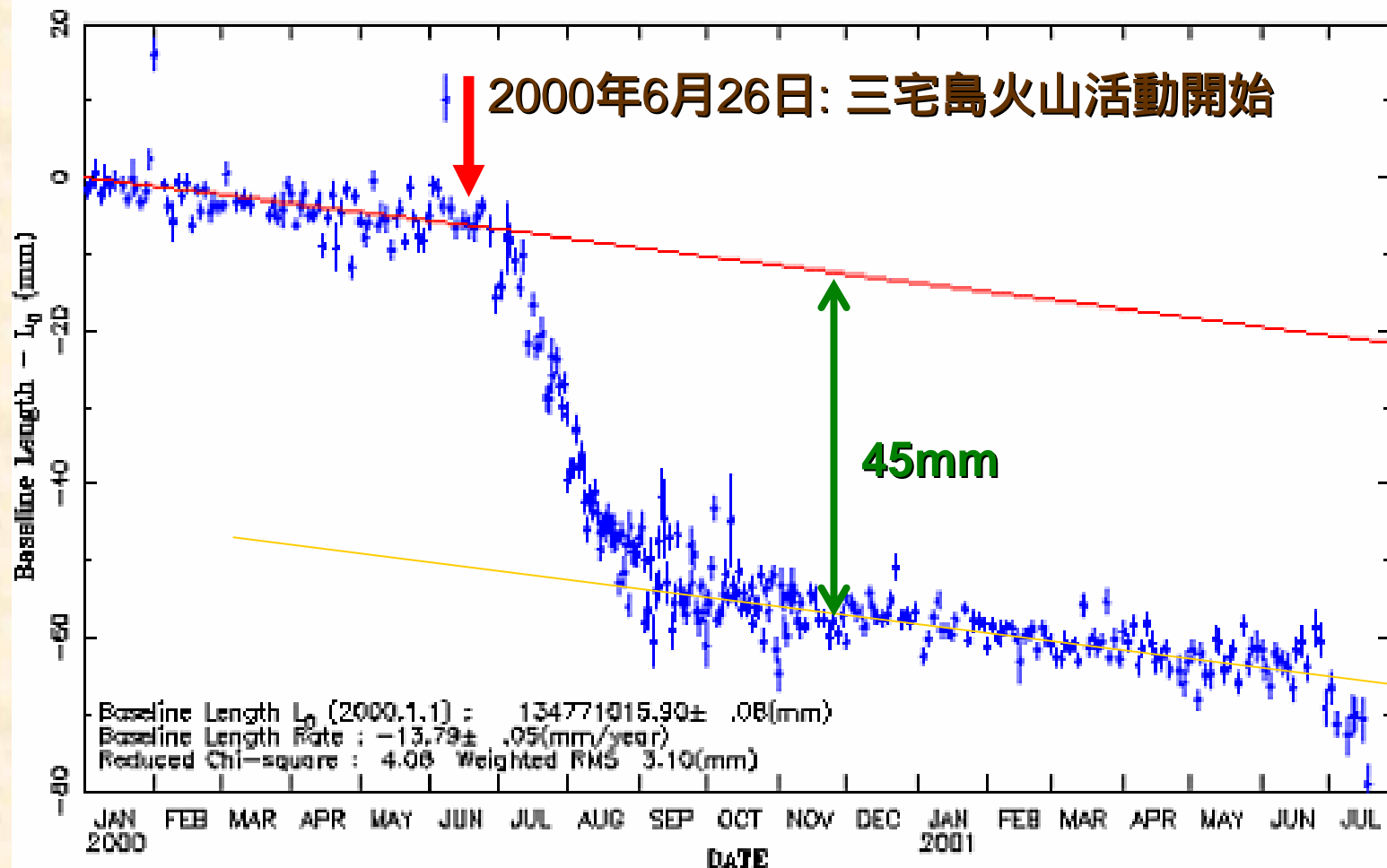
伊豆諸島の地震・火山活動により、地殻変動は
南房総にまで影響した。特に、鹿嶋 - 館山基線
では2cm/月を超す大きな地殻変動を観測した。



鹿島 - 館山基線長変動

20-Jul-01 02:56:24 (JST)

KASHIM11-TATEYAMA



e-VLBI System Developments at NICT

ADS1000

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



ハードウェア + ソフトウェア 関連処理技術

PC-VSI Board

(Supports VSI-H specifications)



VSI

VSI

Correlator
other DAS

Internet

高速ネット

ハードディスク

PC : データ記録
関連処理

CPUスピード

IP-VLBI Board

(~16Msample/ch·sec, ~4ch, ~8bits)



ADS2000

(64Msample/ch·sec, 16ch, 1bit or 2bits)

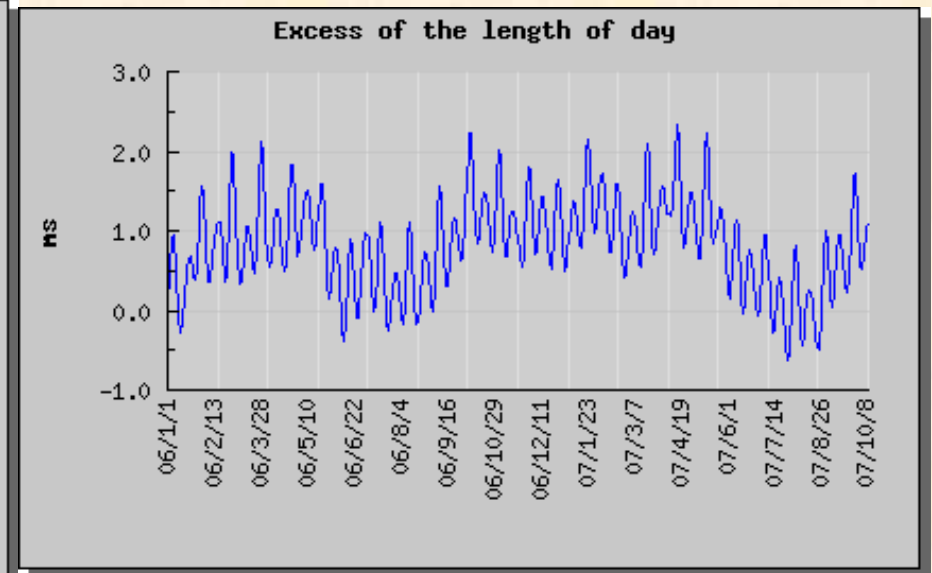
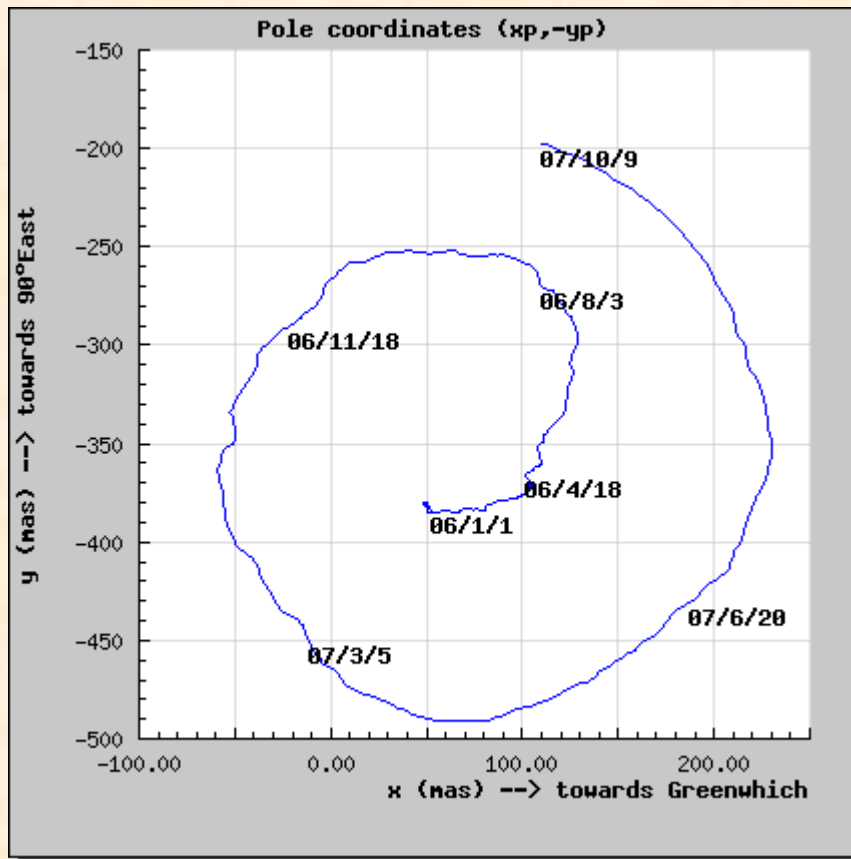


K5 VLBIシステム

- ◆ 国土地理院、国立天文台(測地)
 - ◆ 国立極地研究所(南極)
- に配備され、測地実験に使用。
- ◆ 鹿児島大学、北海道大学、筑波大学、山口大学、
- 電波分光計としてソフトウェア開発が進んでいる。
- ◆ 宇宙科学研究本部/JAXA
- 臼田(64m)、内之浦(34m)に配備され、飛翔体のVLBI観測に使用。



極運動とUT1



Earth Orientation Center
Paris Observatory

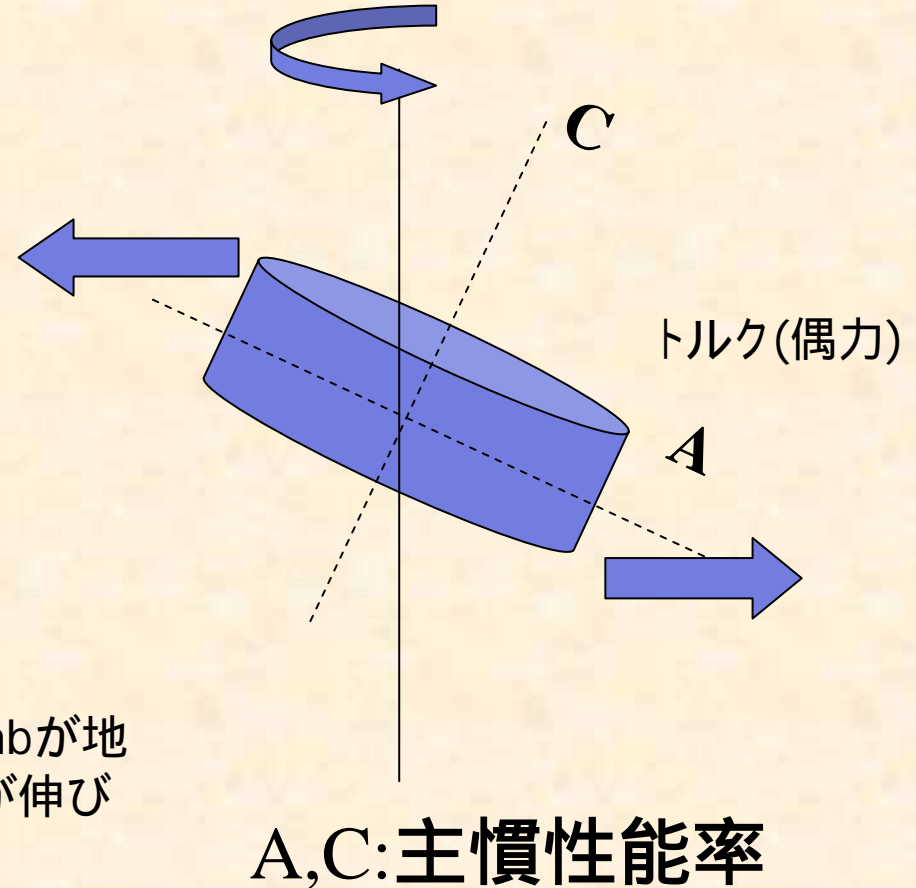
<http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>

極運動 ~ 自由振動

スイスの数学者オイラー (1756年):
剛体運動を仮定し、地球に305日周期
の自由運動を予言

$$T_E = T_0 \frac{A}{C - A}$$

米国チャンドラー (1891年):
周期が430日の極運動を発見し、Newcombが地球が弾性体であることによりオイラー周期が伸びているためと説明した。



UT1 Challenge with e-VLBI : June 29, 2004



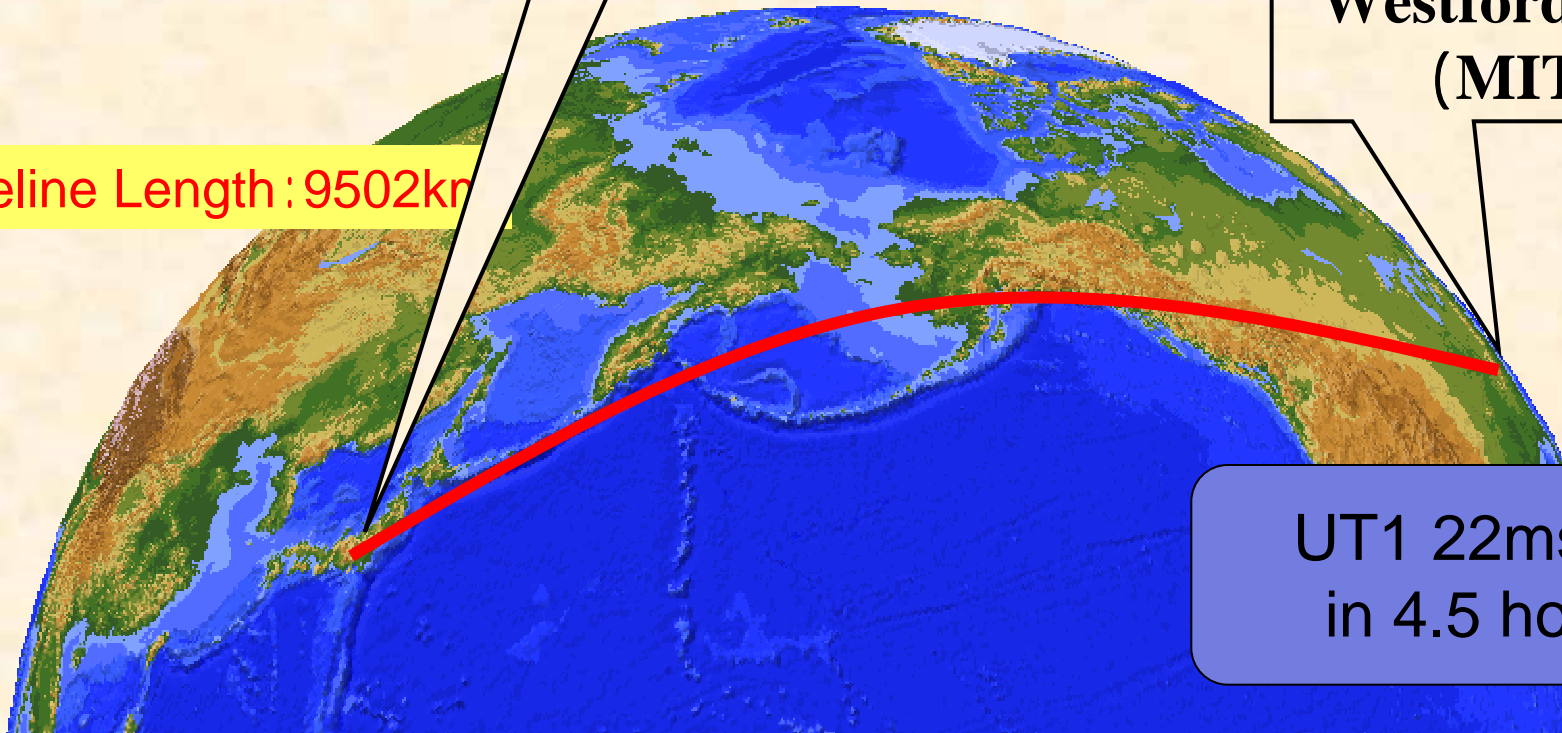
FTP-Based
Data Transfer

**Kashima
34m (NICT)**



**Westford 18m
(MIT)**

Baseline Length : 9502km



UT1 22msec.
in 4.5 hours

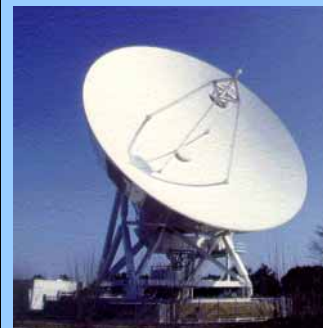
Ultra-rapid UT1 Experiment

データレート: 256 Mbps
1時間のVLBI観測の後
30分以内にUT1を算出

Onsala20m
(シャルマー大学)



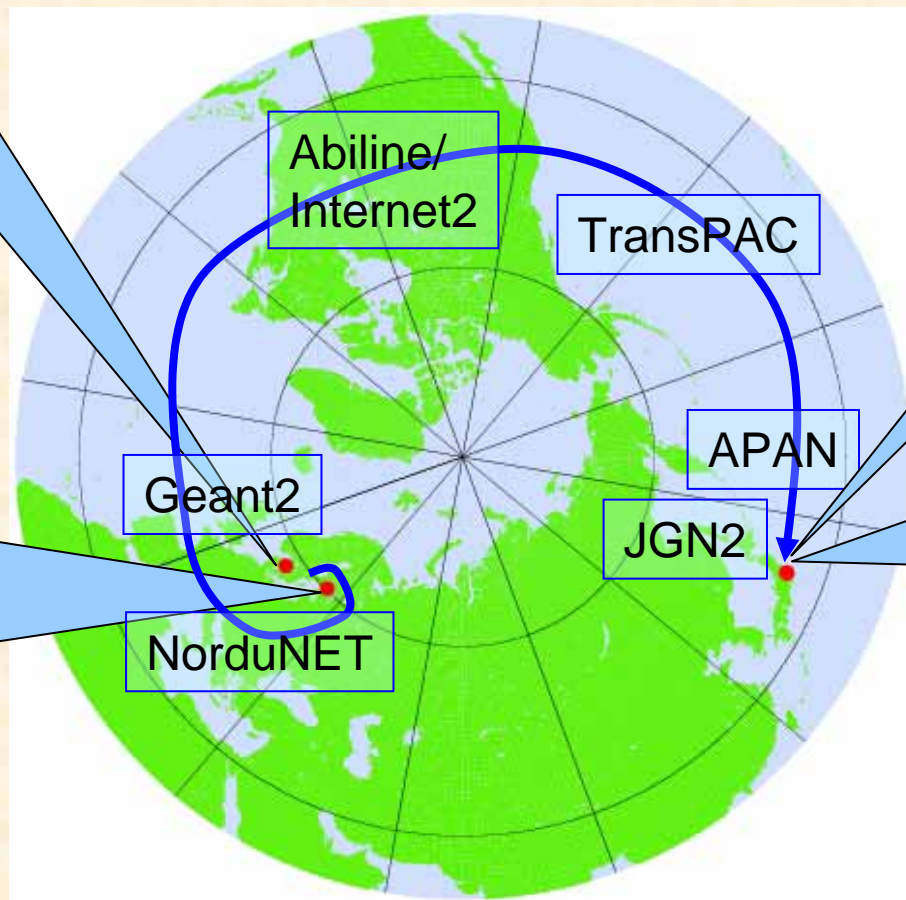
つくば32m (GSI)



鹿島34m (NICT)

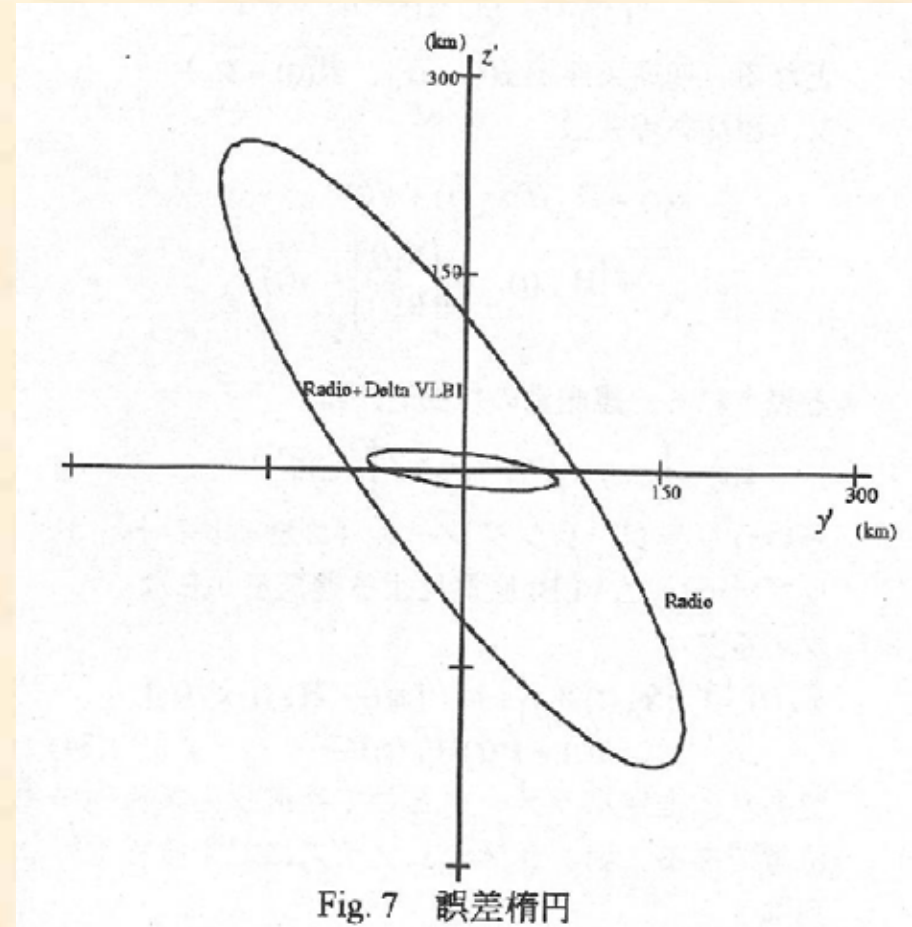
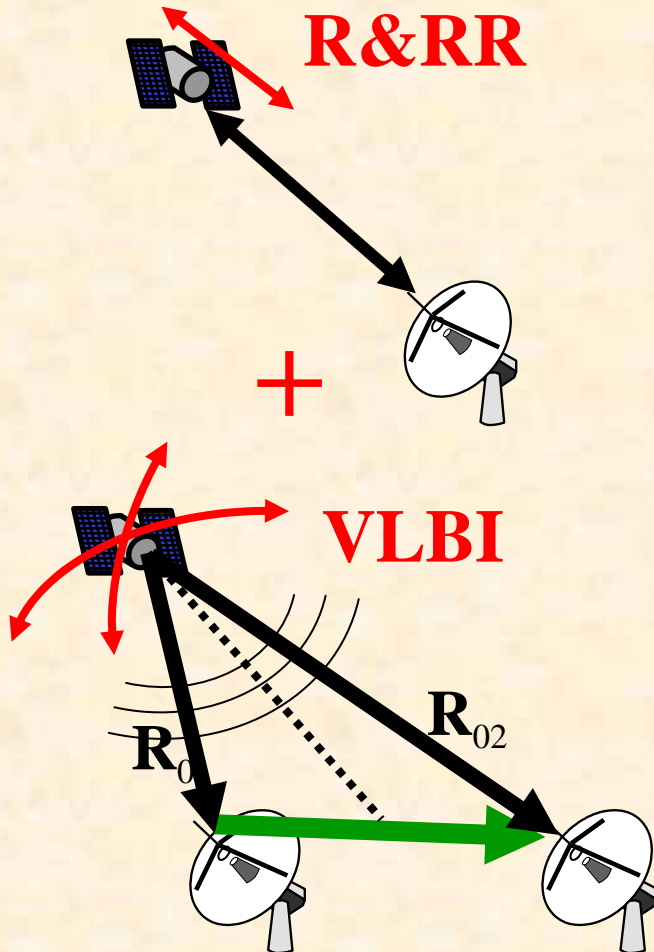


Metsahovi14m
(ヘルシンキ工科大学)

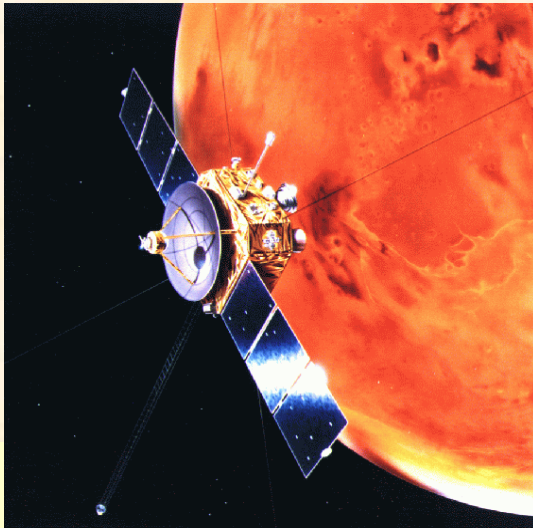


Spacecraft Navigation

R&RR + VLBI

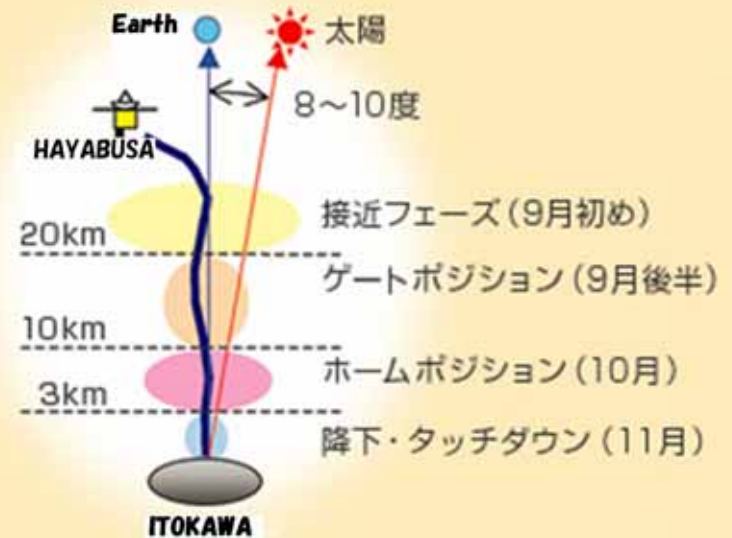
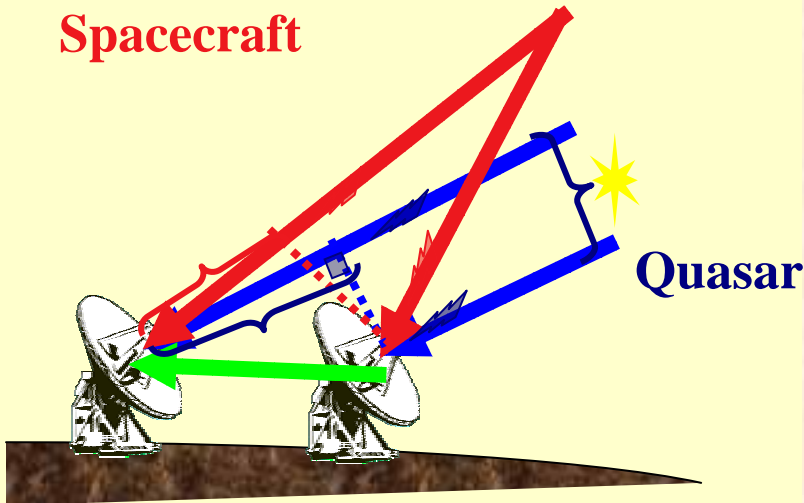


深宇宙飛翔体の R&RR + VLBI軌道決定



Spacecraft

Quasar



(JAXA HP)

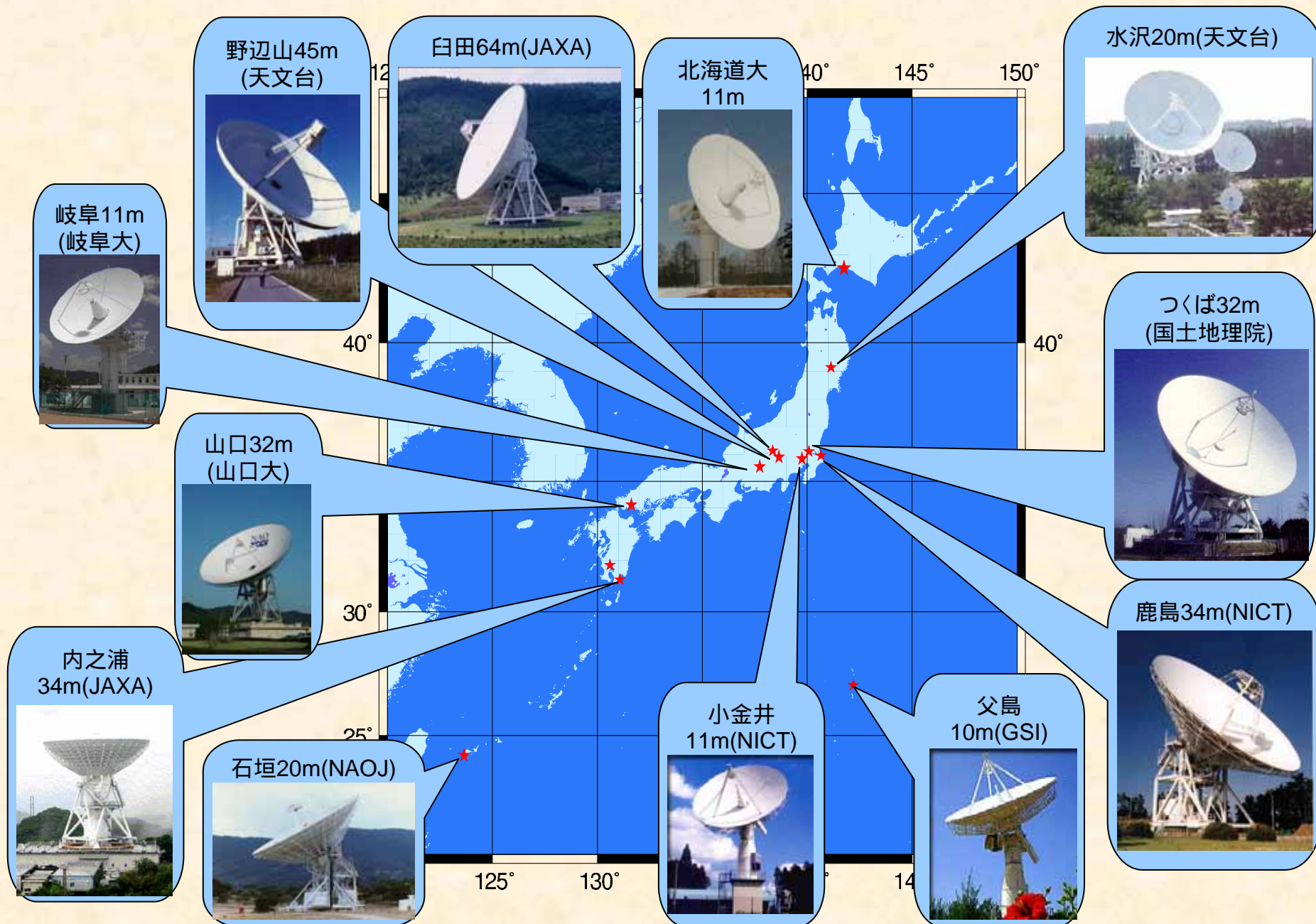
世界のVLBIコミュニティで使われる K5ソフトウェア関連器



光結合VLBI

(国立天文台・大学・
NICT・国土地理院)

日本のVLBI観測局



光結合VLBI観測網(~ 2008.3)

SINET3

JGN-2

GEMnet2

Nobeyama
45m



Usuda 64m



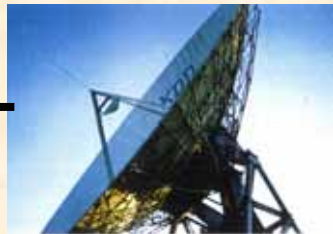
Koganei

JGN-2



Kashima 34m

Yamaguchi
32m



Yamaguchi
University

GEMNET
By NTT

NAOJ
(Correlation
Site)

High Energy
Accelerator
Research
Organization

National
Institute for
Fusion
Science

Tsukuba
32m

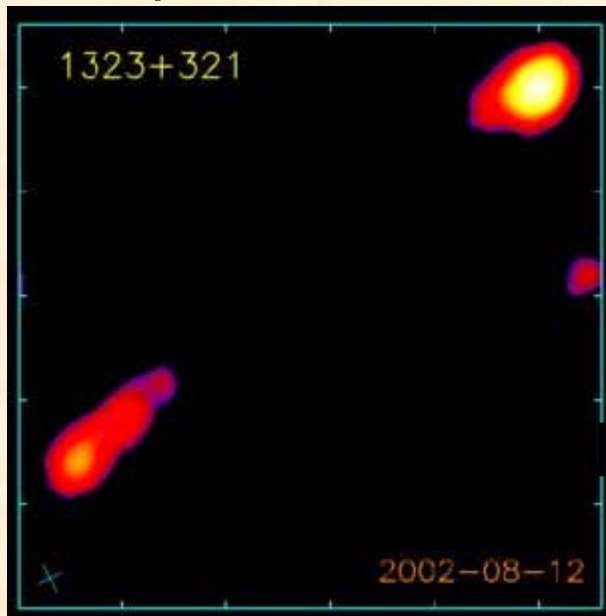


Gifu 11m



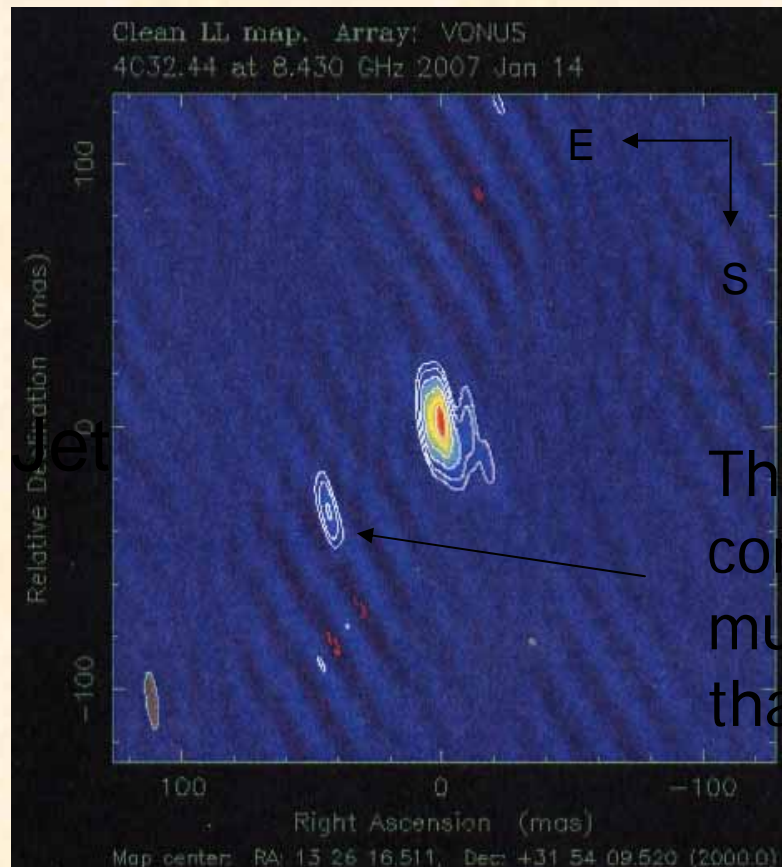
4局光結合イメージング観測

Expected



感度: 1 mJY ,
10⁵ K

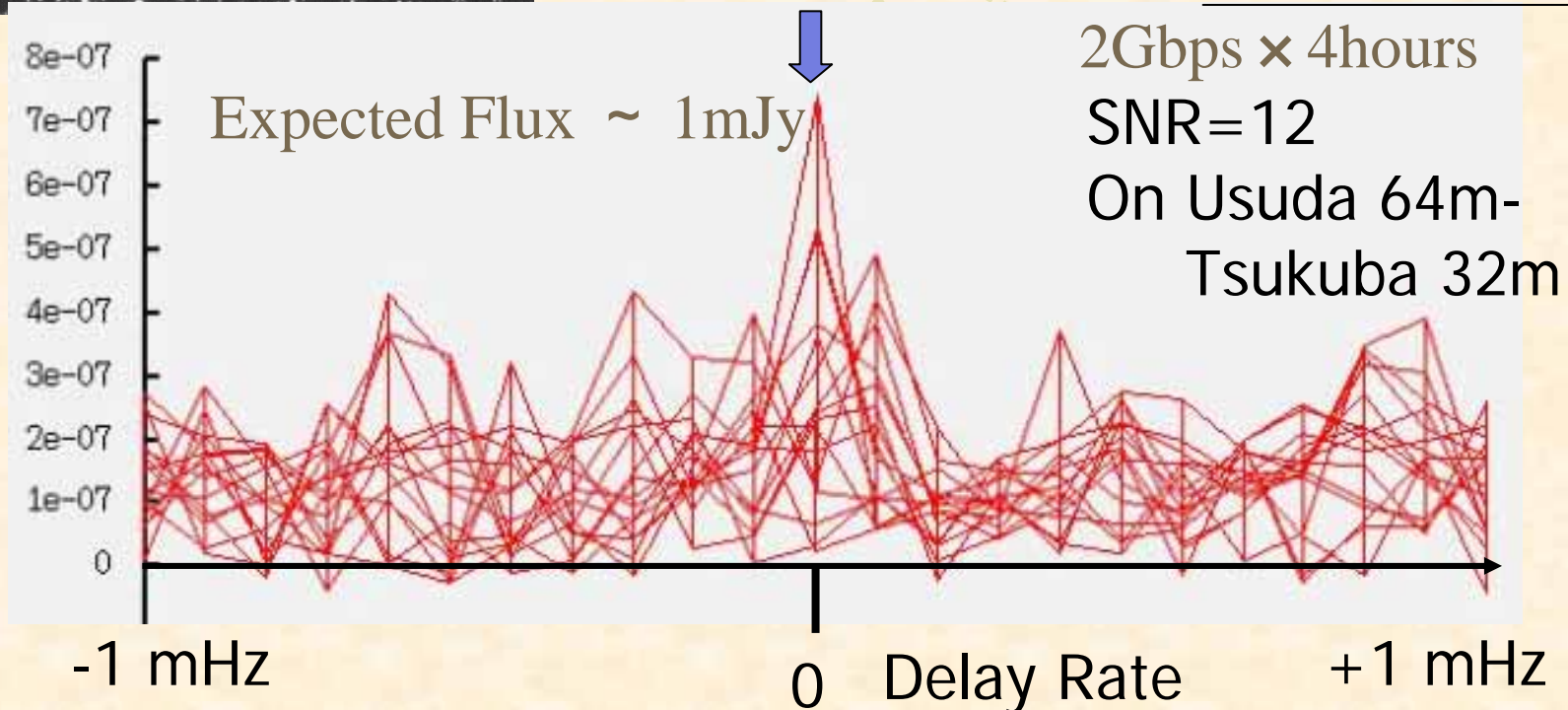
U64-T32-K34-Y32 (850km)



The south-east component is much darker than expected.

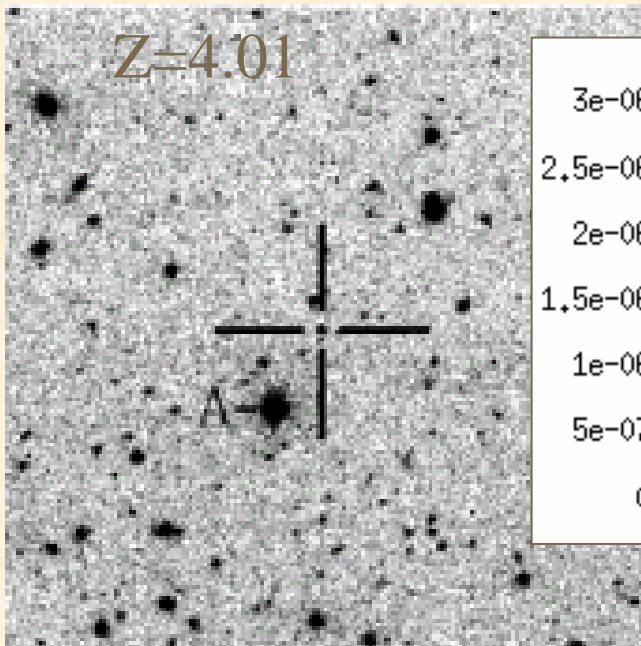
Deep integration to detect a weak radio source, P-Cygni

One of Blue Giant Stars was detected.

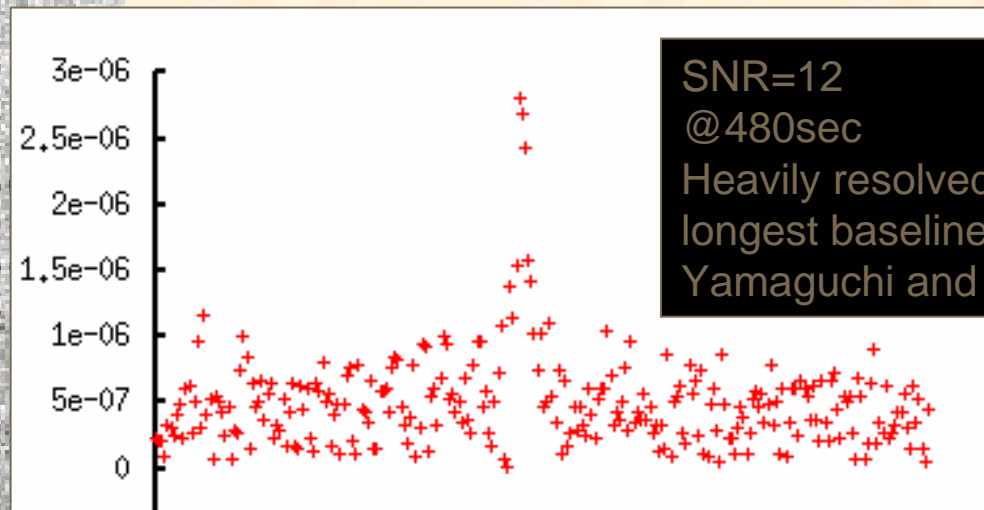


High Red-shift Objects

Large red shift objects are believed to be very young galaxies those formed in very early stage of the universe.



13 billion light years
away from us



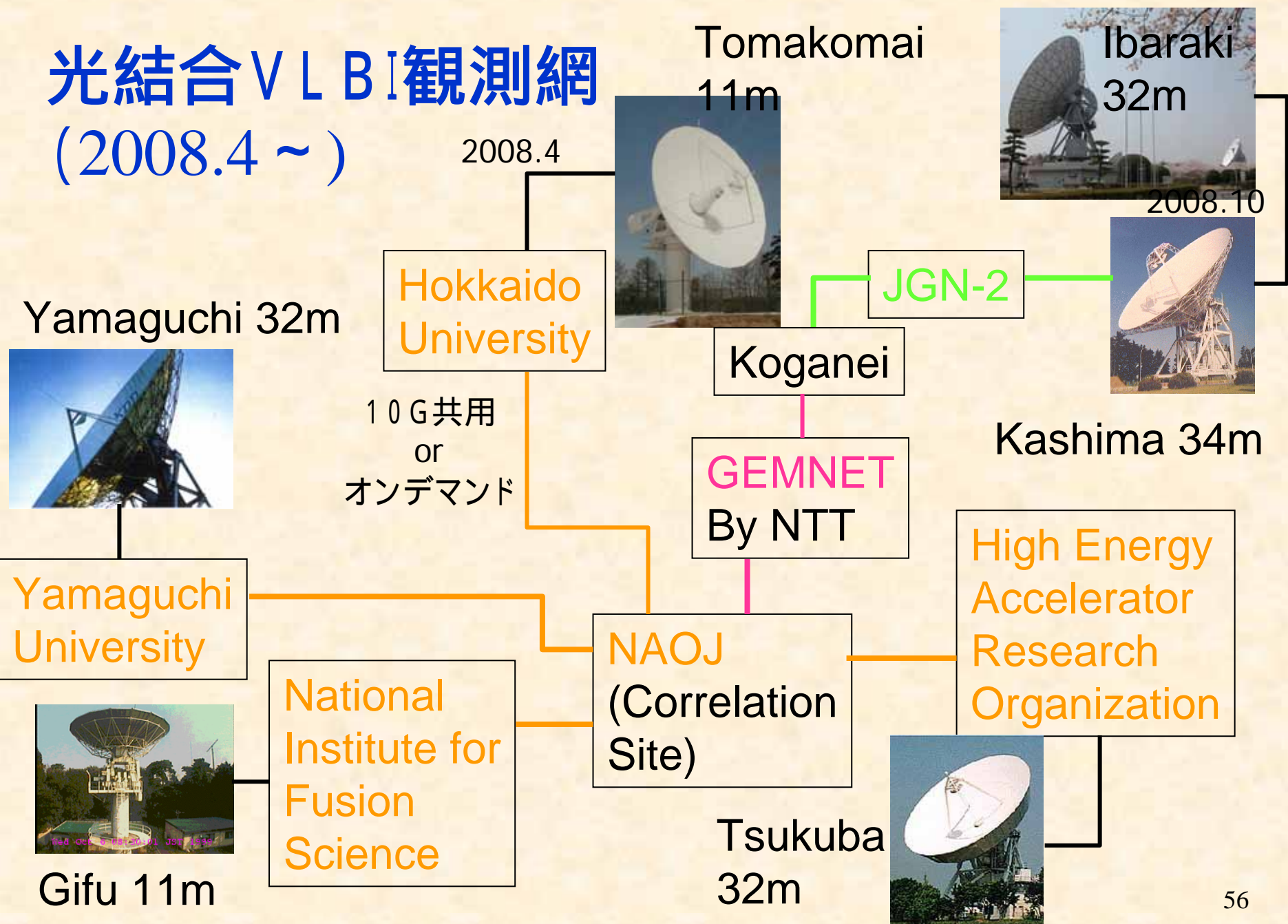
SNR=12
@480sec
Heavily resolved on the
longest baseline between
Yamaguchi and Kashima.

We first found the extended structure
on GB1713+2148.

ネットワークの変化

| 観測局 \ 周波数帯 | 2G | 8G | 22G | 43G | 備考 |
|------------|----|----|-----|-----|------------------|
| 臼田 6 4 m | | | | | 2008年4月より回線断 |
| 野辺山 4 5 m | | | | | 2008年4月より回線断 |
| つくば 3 2 m | | | | | 筑波大学が22G整備中 |
| 鹿嶋 3 4 m | | | | | 鹿嶋－小金井回線はNICT |
| 岐阜 1 1 m | | | | | 2007年より22Gに移行 |
| 山口 3 2 m | | | | | 2006年3月1日にSS回線接続 |
| 茨城 3 2 m | | | | | 光結合茨城ルート検討中 |
| 苫小牧 1 1 m | | | | | 07年度中にアクセス回線開通 |

光結合VLBI観測網 (2008.4 ~)

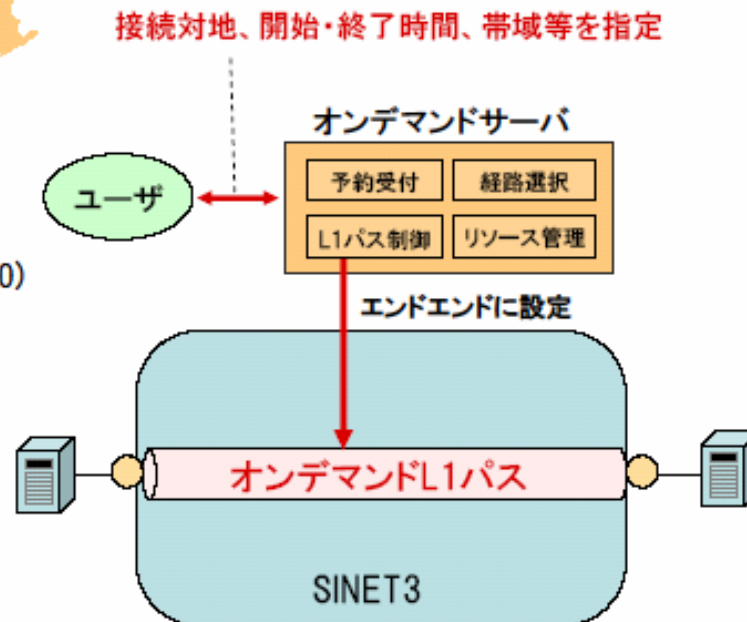
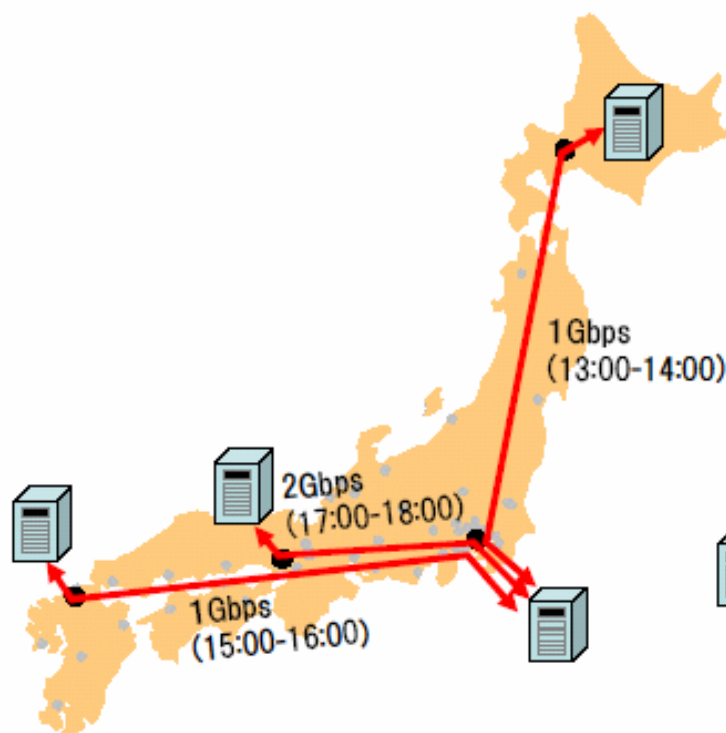


オンデマンド接続



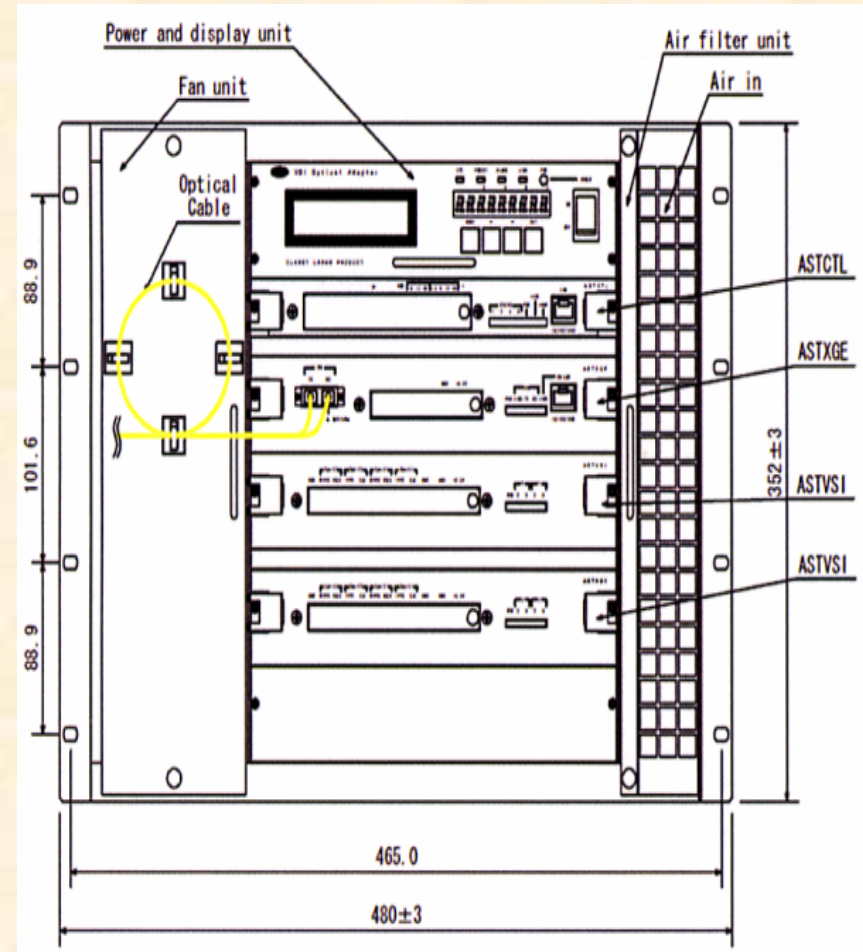
レイヤ1帯域オンデマンドサービス

- ◆ ユーザ側から直接、接続対地、開始・終了時間、帯域(150Mbps単位)を指定して、オンデマンドレイヤ1パスを設定することが可能になります。
- ◆ エンドエンドの遅延時間が最小となる経路などを選択することも可能です。



10GbE Access Unit

- ◆ 2G × 4 10GbE
 - 500MHz帯域幅、最大4ch
 - 1GHzサンプリング
 - 2ビット/サンプル
- ◆ 他ユーザーとの回線共用
- ◆ 輻輳状況に応じて帯域制御
 - チャンネル数を減らす
 - 最大4ch、最小1ch
 - 8Gbps - 2Gbps
 - サンプルビット数を減らす
 - 2ビット/サンプルから1ビットへ
 - 1Gbps単位での帯域制限が可能
- ◆ 今年度中にフィールド試験



茨城32mアンテナの オンライン化に向けて

200m離れた2基の32mアンテナ



茨城県内大型望遠鏡アレイ



光結合茨城ルート

国土交通省開放光ファイバの利用

日立市
ひたちなか市
鹿嶋市

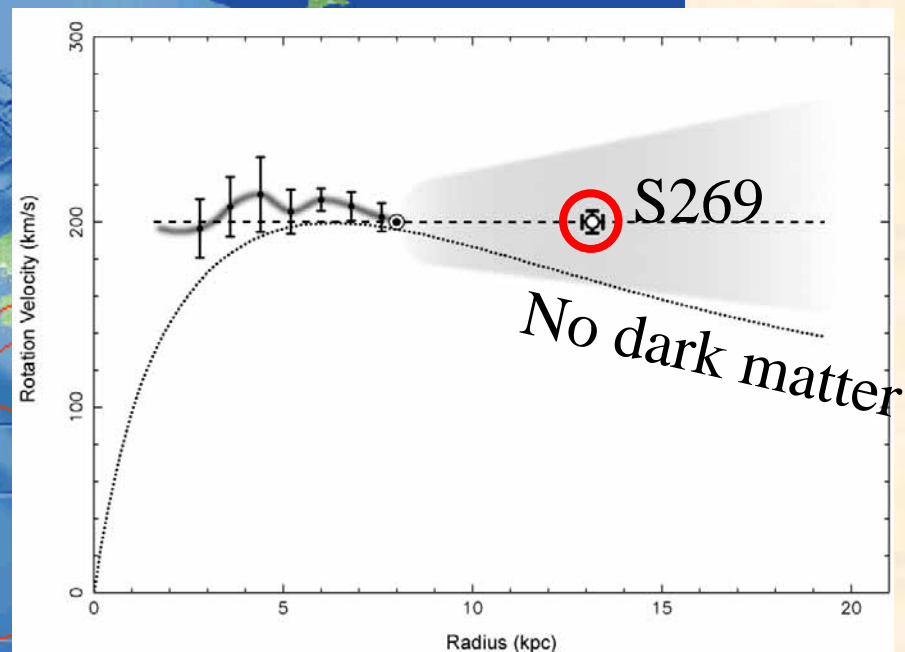
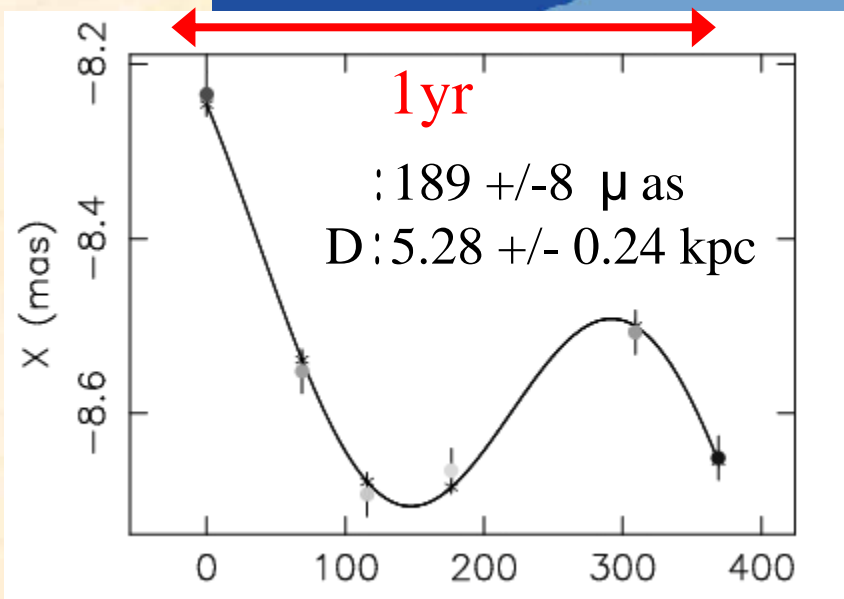
ローカルアクセス、中継機設置は日本通信放送(ひたちなか市)に依頼

鹿嶋 (JGN) 小金井
武蔵野 三鷹
の既設回線を利用して結合



VLBI観測網 (VERA) の オンライン化に向けて

VERA 観測局配置図

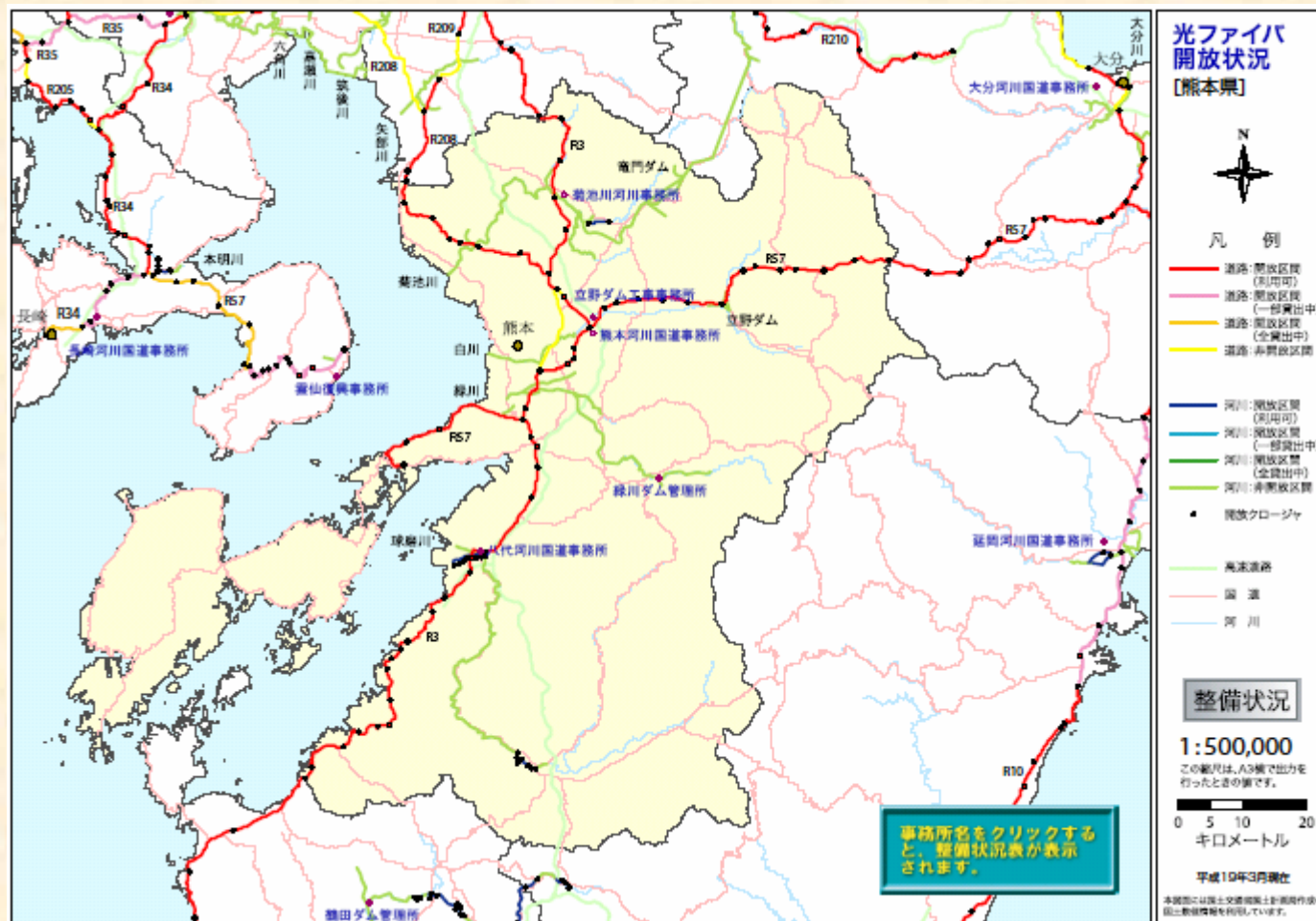


石垣島局

熊本県内ファイバ

国道3号線沿いに国土交通省開放光ファイバあり

3号線にアクセスできれば福岡まで開放ファイバの利用可能

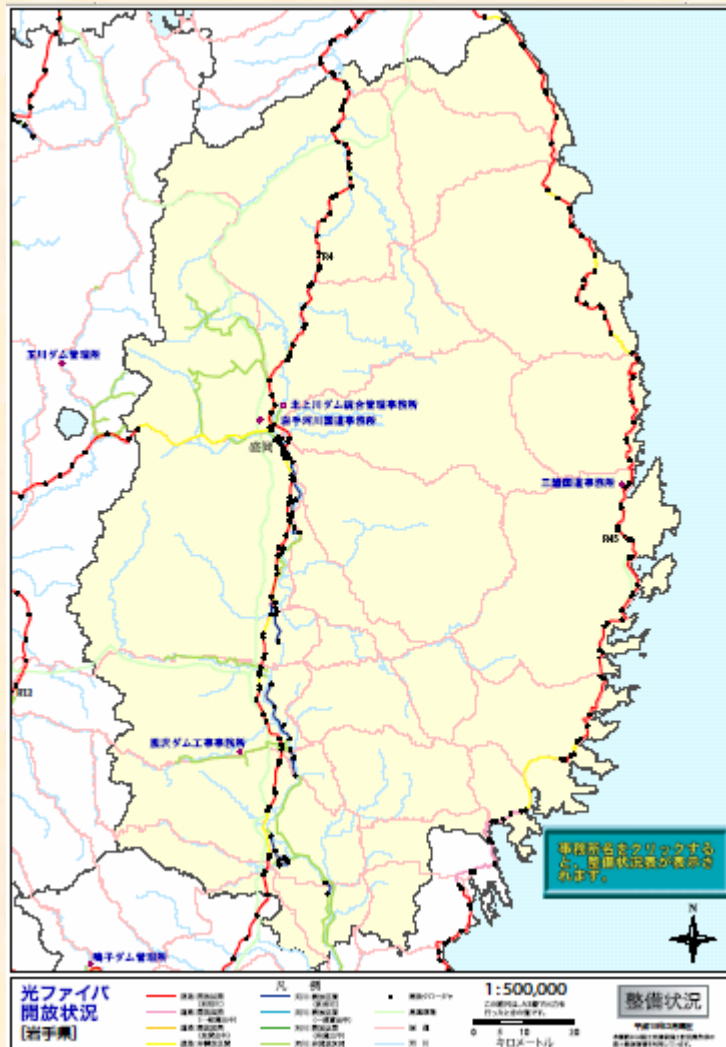


岩手県内ファイバ

国道4号線ルート

平泉付近にファイバなし

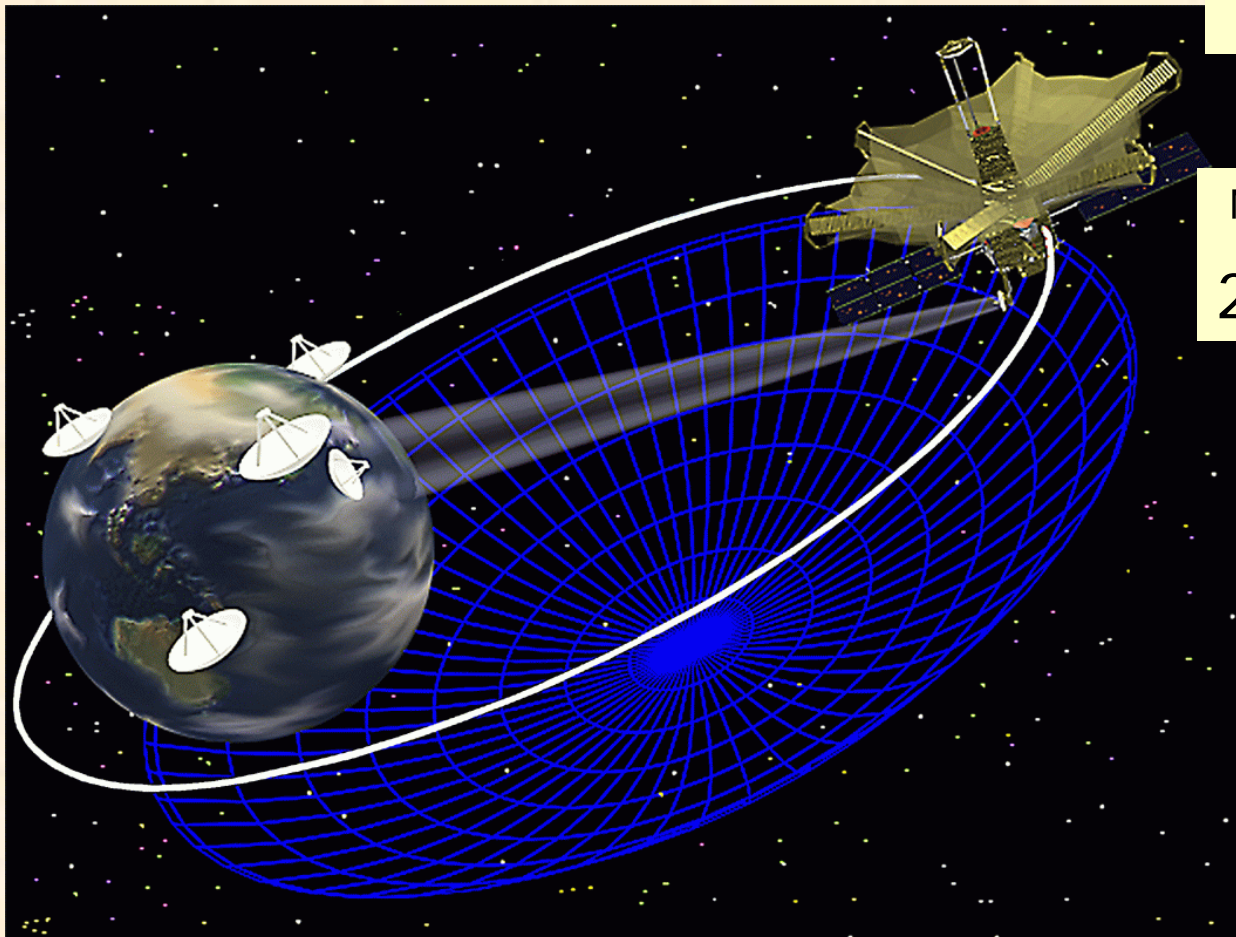
宮城県には開放ファイバあり



宇宙空間VLBI

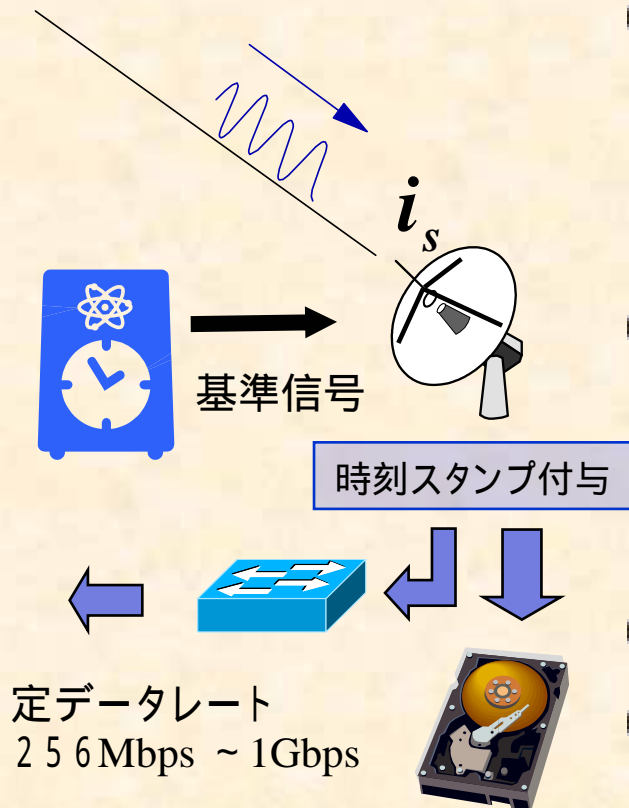
宇宙電波望遠鏡
「HALCA」 1997

↓
「Astro-G」
2012年打ち上げ予定



ご静聴ありがとうございました。

ネットワークへの要求



- 可干渉性(位相情報)を保存したデータ転送
 - エラーレートは高めでも構わないがビットメイク、ビットスリップは許容できない。
- 一定データレートのデータ生産を漏らさず記録・伝送すること
 - 1.e-3程度のエラーがランダムに生じて大丈夫。
- 長距離(国内、国際基線)伝送
- データレート: 256 M ~ 1 Gbps/station