

7 時空標準研究室における国際標準化活動

7 *International Activities in Space-Time Standards Laboratory*

7-1 時空標準活動に関する国際的枠組みへの貢献

7-1 *Contribution to the International Framework for Space-Time Standard Activities*

花土ゆう子 細川瑞彦 小山泰弘 根津ひろみ 小竹 昇 伊東宏之
藤枝美穂 後藤忠広 市川隆一 関戸 衛 井戸哲也

Yuko HANADO, Mizuhiko HOSOKAWA, Yasuhiro KOYAMA, Hiromi NEZU, Noboru KOTAKE, Hiroyuki ITOH, Miho FUJIEDA,
Tadahiro GOTOH, Ryuichi ICHIKAWA, Mamoru SEKIDO, and Tetsuya IDO

あらゆる計測の基盤となる時間・周波数及び位置の基準は、歴史的な各種変遷を経て確立された国際的な枠組みにより、国際標準値の維持と共有が実現されている。我々は、日本を代表する標準・研究機関として、上記の国際的な枠組みに継続的に参加し各種の貢献をしてきた。本稿では、時空標準に関連する国際的枠組みの概要と我々の貢献の実績について紹介する。

The standards of time, frequency, and positioning are the foundation of all modern technology. They are maintained and shared by international framework which have been established through some historical transitions. We have been participating in such international frameworks and made various contributions as a representative research institute in this field in Japan. This paper gives an overview of international frameworks related to space-time standards and the achievement of our contributions.

1 はじめに

時間・周波数の標準及び位置の基準はあらゆる計測の基盤であり、世界的な標準値の維持と共有がなければ生活や産業を支える各種先端技術に大きな支障を生じる時代である。この技術分野においては、時間も位置も国際標準や基準値にトレーサブルでないと計測の信頼性を評価されないこと、国際標準や基準値の維持はグローバルかつ定常的な計測が支えていること、その実現のためには機関間で相互に助け合いながらレベルアップを目指すことが必須であり、特許による囲い込み等ではなく標準化を目指す方向であること、といった特色があり、これが国際枠組みによる活動のモチベーションにもなっている。

時間・周波数標準に関する歴史的な経緯を見てみると、19世紀中頃の運輸・通信の発達で国際的な時刻ルールの共有を促し、その後、秒を含む国際的な計量単位(度量衡)を取り決める動きが進み、メートル条約(2参照)が締結された。これが現在の、時間・周波数標準を維持する国際的な枠組みの大元となっている。一方位置基準においては、宇宙空間での地球の動

き(地球回転)を知るために19世紀末頃から天文台による天体観測が行われてきたが、VLBI技術の登場により測地精度が飛躍的に向上し、現在は各国のVLBI観測局が電波天体の定常観測データを国際地球回転・基準系事業(IERS、5参照)に提供している。世界測地系に準拠した地表における位置基準の構築に関しては、GPS衛星を利用した測地技術の進化とともに成熟したため比較的歴史が新しく、研究機関等のボランティア的活動により国際GPS事業(IGS、4参照)が発足したのは1994年である。IGSはその後各種測位衛星システムの登場に伴い、2005年に国際GNSS事業と改名し現在に至る。

時空標準研究室及びその前身となる室・部においては、日本標準時の生成と供給・周波数標準の源となる原子時計の開発・測位衛星等を仲介とする高精度時刻比較技術の開発・VLBI技術の開発などに長年にわたり取り組み、上記の国際的な枠組みにも早くから参加してきた。時刻標準においては、総務省告示に基づき、NICTが生成する協定世界時UTC(NICT)に9時間を加えたものを標準時として標準電波や通信ネットワーク等を通じて日本国内に供給しており(NICTで

はこれを日本標準時と称している)、実際にもこの標準時が広く利用されている。国際的にも NICT は国の標準時を維持する機関としての処遇を受け、時間周波数諮問委員会 (CCTF、2 参照) の正式メンバーに登録されている。位置基準に関しては、VLBI システム開発において国内外から高く評価され、国際 VLBI 技術開発センターの役割を担うとともに、国際地球基準座標系・国際天文基準座標系の構築については、国立天文台・国土地理院と共に国際地球回転観測網に参加してきた。特に、鹿島 26 m アンテナ・34 m アンテナが長年にわたり国際地球基準座標系における日本の位置の基準となってきたことは、大きな貢献と考えられる。また GNSS 測地においては、国土地理院との協力の下 IGS 観測網に参加し、世界測地系構築に貢献してきている。

本稿では、時間・周波数標準に関する国際的枠組みへの貢献としてはメートル条約に基づく国際委員会 2 及びアジア太平洋地域での活動 3 について、位置基準に関しては IGS における活動 4 及び VLBI に関する国際活動 5 についてそれぞれ紹介する。また国際天文学連合 (IAU) 及び国際電波科学連合 (URSI) に関する活動について、6 で紹介する。各分野で個別の研究機関との共同研究等も精力的に行ってきたが、個々の研究成果の詳細については論文等を参照いただきたい。なお本文中には組織の英語表記など多数の略語が頻出するが、参照のたびに初出箇所を探すのも煩雑なため、その正式名称を本編の最後にまとめた。

「メートル条約」[1][2] である。これは、「メートル法を国際的に確立し、維持するために、国際的な度量衡標準の維持供給機関として、国際度量衡局 BIPM を設立し、維持することを取り決めた多国間条約」[2] であった。正式加盟には国としての資格と分担金の納入が必要であり、日本は 1885 年に加入している [1][3]。

メートル条約に基づく最高議決機関は、正式加盟国の代表者で構成される国際度量衡総会 (CGPM) であり、原則 4 年ごとに開催される。CGPM 決定事項の代執行機関は国際度量衡委員会 (CIPM) である。CIPM は事実上の理事機関であり、日本を含む国籍の異なる 18 名の委員から構成され原則年 1 回開催される [1]-[3]。国際度量衡局 (BIPM) は CIPM 下の機関である。図 1 にメートル条約に関連する国際的枠組みの構成を示す。

CIPM 下には現在、長さや質量など分野別に 10 の諮問委員会 (CC) が置かれ、課題はここで具体的に検討される。CC は研究実績のある国家計量標準機関 (NMI) を中心に構成される [2]。時間・周波数に関する諮問委員会は CCTF であり、そのミッションは、「秒の定義とその実現、国際原子時 TAI と協定世界時 UTC の確立と普及及び時間と時系に関する CIPM への助言」である [4]。

CCTF は現在、チェア及び 26 の機関・5 つの国際組織・4 つのオブサーバーから構成され [4]、BIPM が事務局を務める。また課題別に 9 つのワーキンググループ (WG) を有する (表 1)。2016-2026 年の期間における CCTF 及び各 WG の構成・ミッション等は CCTF-strategy ドキュメントで公表されている [5]。総会は原則 3 年ごとに開催され、通常の流れでは、一次周波数標準器・標準時系・国際時刻比較・次世代技術 (光周波数標準やファイバリンク等)・CIPM 相互承

2 計量の国際標準に関する活動

2.1 メートル条約に基づく活動

計量の国際基盤は 1875 年に締結された外交協定

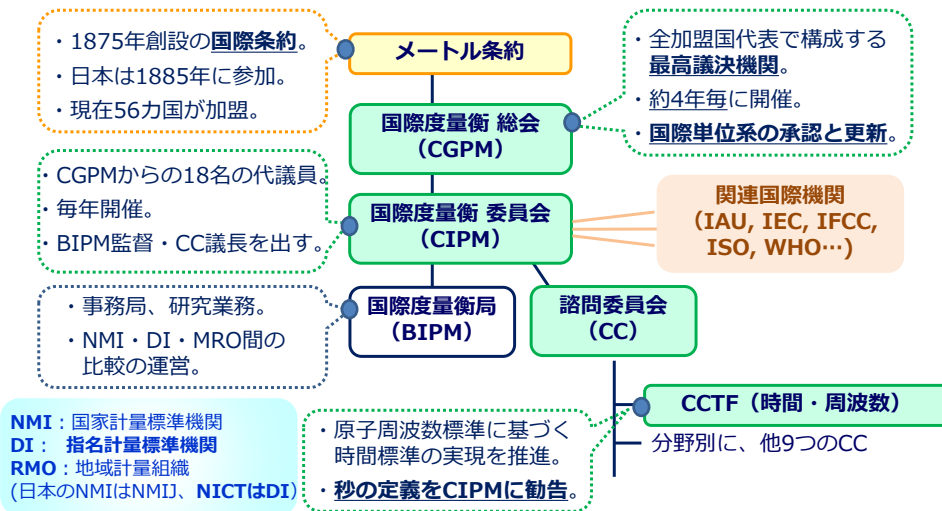


表1 CCTF – WG リスト

略称	CCTF working group
WG TAI	Working Group on International Atomic Time
WG Algo	Working Group on Algorithms
WG PSFS	Working Group on Primary and Secondary Frequency Standards
WG GNSS	Working Group on GNSS Time transfer
WG TWSTFT	Working Group on Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer
WG ATFT	Working Group on Coordination of the Development of Advanced Time and Frequency Transfer Techniques
* SGOF	* ATFT Study Group on optical fibers for use in UTC
WG MRA	Working Group on the CIPM MRA
WG SP	Working Group on Strategic Planning
CCL-CCTF FSWG	CCL-CCTF Frequency Standards Working Group

認協定 (CIPM-MRA、2.2 参照) と地域計量組織 (RMO、3.1 参照) 状況・他の国際枠組みの報告に続いてトピック課題が議論される。例えば 2012 年は UTC の今後について、2015 年は衛星時刻比較受信機の国際校正の枠組みについて、2017 年は再度 UTC の今後について議論がなされた。必要に応じて Recommendation 等が議決され CIPM にあげられる。過去の会議資料は [6] で確認できる。

WG は独立に課題実行の責任をもち、参加資格も WG ごとに異なる (例えば現在 CCL-CCTF-FSWG では 8 機関のみに限定)。多くの WG ではチェアの呼びかけに応じて会合が随時開かれ、具体的な課題について議論する。ただ全ての TAI 参加機関が構成員となる TAI-WG は特殊であり、その会合は CCTF の活動報告・計画等における実質的な議論の場である (総会は決議の場)。実際 2017 年の事例では、総会前日に開催された WG TAI 会合の議題は総会と大幅に重複していた。

3 年ごとに開かれる CCTF 総会には、CCTF-TAI-WG の構成メンバーとして、NICT 理事長から指名を受けた機関代表者が参加している。短時間ではあるが参加機関のトピックを紹介する時間もあり、周波数標準器の開発状況などを報告してきた。WG 活動においては、2012 年から花土ゆう子が CCTF-WG-ALGO のチェアを務めるほか、委員として CCTF-WG-TWSTFT (藤枝美穂)、CCTF-WG-GNSS (後藤忠広、市川隆一)、CCTF-WG-ATFT (小山泰弘、藤枝美穂、井戸哲也) に参加し、ワークショップ開催や国際実験の参画などに貢献してきている。

時空標準研究室及びその前身となる研究室では、運用する原子時計データ及び衛星時刻比較データを 1985 年から 30 年余にわたり BIPM に定常的に提供し、TAI・UTC の構築に高い寄与率で貢献してきた (参加機関 70 余の中ではほぼ 5 位以内)。2011 年からは UTC 速報値 (UTC_r、毎週公表) の構築にも参加している。

Cs 一次周波数標準器の絶対周波数も CCTF-WG-PSFS に承認され (熱ビーム型 NCT-O1 は 2004 年 [7]、原子泉型 NICT-CsF1 は 2007 年 [8])、TAI 構築に貢献した。また Sr 光格子時計は 2012 年に CCTF-WG-PSFS から絶対周波数の承認を受け、2019 年 1 月に光周波数標準器として世界で初めて直近の TAI 校正に採用された [9]。2025 年頃目途で検討されている秒の再定義には光周波数標準が採用される見込みだが、これはその実働の先駆けとなる成果である。

2.2 CIPM 相互承認協定 (CIPM-MRA)

計量標準の定義や実現方法はメートル法に基づく枠組みで決定されるが、もうひとつ重要な国際取決めとして CIPM 相互承認協定 (CIPM-MRA) がある。その目的は、各国の測定標準の同等性を認めその校正・測定証明書を相互承認するための仕組みの構築であり、メートル条約の代替や拡張ではなく外交協定でもなく、NMI 所長間の技術的取決めという位置づけである [1]。これは製品輸出に関する国際貿易の円滑化に大きく貢献している。

CIPM-MRA に参加するには、校正・測定のレベルを維持する品質システムの審査及び校正・測定能力 (CMC) の技術審査等を受ける。次いで RMO 内外の審査を順に受け、合格したものは BIPM が管理する基幹比較データベース (KCDB) に登録され世界に公表される。審査においては、CC-WG-MRA・RMO・BIPM がそのプロセスに責任を持ち、BIPM と RMO の合同委員会 (JCRB) が KCDB 登録への責任を持つ [1]。CIPM-MRA の詳細については、文献 [1][2] 及び BIPM の web サイト [10] を参照されたい。また NICT の活動については関連の深い 3.1 で紹介する。

CIPM-MRA に署名できるのは 1 か国 1 機関だけであり、日本では産業技術総合研究所 (AIST) の計量標準総合センター (NMIJ) がその任を負う NMI である。ただし国家標準を持つ他の機関も、所定の審査を経た

7 時空標準研究室における国際標準化活動

のち NMI から指名を受けることで CIPM-MRA に参加可能である。このような機関は指名計量標準機関 (DI) と呼ばれる [1]。NICT は DI である。NICT は周波数国家標準を所掌してはいるが、CIPM-MRA においては NMI カテゴリーに属さないので注意が必要である。

3 アジア地域における国際活動

3.1 アジア太平洋計量計画 (APMP)

地域レベルでの NMI 間協力は、主に地域計量組織 RMO という枠組み (図 2) で調整される。RMO のひとつである APMP [12] は 1977 年に設立され [1]、CIPM-MRA 構築以前からの歴史を持つ。APMP のミッションは、貿易促進や市場での公平性確保を打ち出すなど経済・産業面からの視点が色濃い [12]。特に各機関の CMC 審査は重要な課題である。APMP はまた開発途上経済圏を支援する活動にも注力している。

APMP の構成を図 3 に示す。日本からは Full Member として NMIJ、NICT (1999 年加盟)、化学物質評価研究機構、日本電気計器検定所が参加する。分野ごとに 12 の技術委員会が設置されており、NICT は APMP 総会、品質システム管理に関する技術委員会 (TCQS) 及び時間・周波数に関する技術委員会 (TCTF) に参加し、現在、TCQS には小竹昇が、TCTF には、機関代表者として井戸哲也が、WG メンバーとして市川隆一が出席している。各技術委員会会合やワークショップを含む総会は年 1 回 12 月頭頃に開催される。

これまでの実績としては、TCTF において議長を 2 期 (2002-2004 年: 今江理人、2008-2011 年: 細川瑞彦) 務め、国際相互承認の立ち上げ期における合意形成や、

承認を受ける期間が増えていく中で手続きを議論し改善を進めるなどの役割を果たすとともに、衛星双方向時刻比較 WG チェア及びコーディネータ (双方ともに藤枝美穂) として機関間調整に尽力した。また 2017 年からは、衛星時刻比較の国際キャリブレーションプログラムにおいて、BIPM から一次校正局として指定されたアジア 3 機関の 1 つとして、市川隆一・後藤忠広を中心となり他機関の校正活動を行っている。その他、ドイツ物理工学研究所 (PTB) が 2014-2018 年に実施した、発展途上国における計量計測の技術向上を目的とする MEDEA プロジェクトに参画し、ワークショップでの講師 (2016-2017 年: 市川隆一) やインドネシア科学院計量研究センター (RCM-LIPI) での現地技術指導 (2017 年: 市川隆一・成田秀樹) を担った。CIPM-MRA 関係では、CMC 審査の事務局を岩間司・齊藤春夫・伊東宏之・小竹昇等が中心となり 2008 年から 2014 まで務め、審査基準の明確化や査察者を決めるうえでの手続きを改善するなどを行うとともに、伊東が主導して CMC 標準化マニュアル (不確かさ計算のガイドライン) を作成するなど (2011 年に TCTF 採択)、アジア太平洋地域における技術向上を牽引してきた。

3.2 国際ワークショップ開催など

現在 TCTF 活動の一環として行われている国際ワークショップ ATF [13] は、NICT が 2000 年に開催した ATF2000 に端を発する。時間・周波数分野において欧州・米国ではそれぞれ定着した国際ワークショップが開催されるが、アジア地域でもそのような研究交流の場を設けたいというのが ATF2000 開催の動機であった。ATF は好評を博し、その後各国持ち回りで隔年開催する時期を経て、2015 年からは



図 2 地域計量組織 RMO の分類 [11]

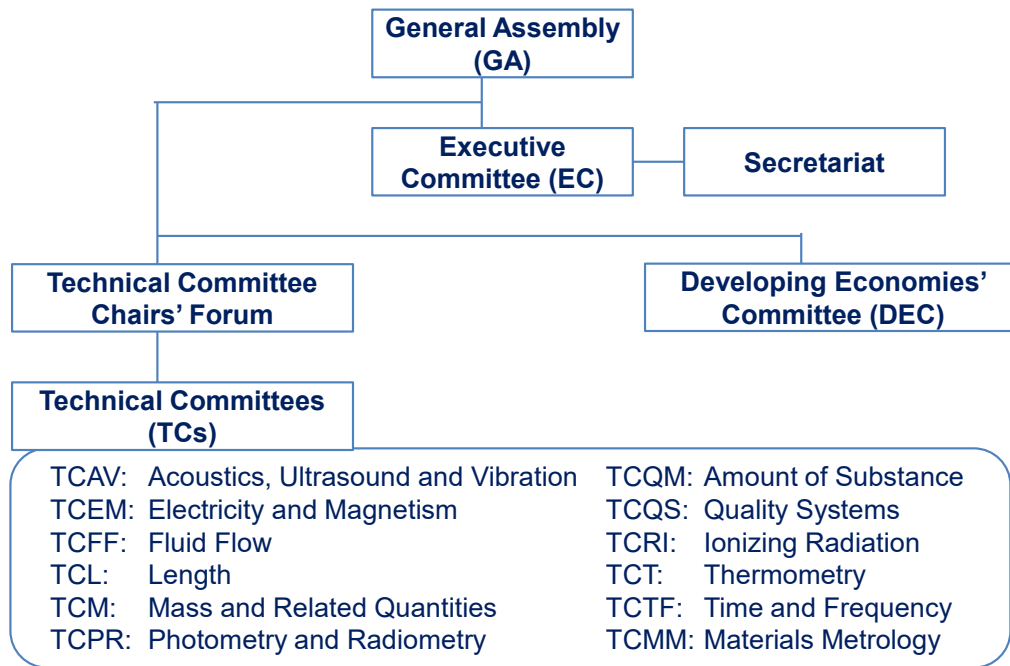


図3 APMPの構成 [12]

TCTFが主催する形で続いている。TCTF主催となつてからもNICTは事務局活動を行うなどATFの継続に貢献している。またATFの翌年にNICTが開催してきたトレーニング目的の研究者招へいプログラム(2000-2009年)も、アジア地域の技術力向上に大きな役割を果たした。実際このトレーニング参加者の多くが各機関のリーダー的研究者として活躍している。

アジア地域限定ではないが、その他にも単発のイベントとして、衛星双方向国際ワークショップ(2004年)、CMCに関するレクチャーを兼ねたワークショップ(2011年)、光周波数標準に関する国際ワークショップ(2015年)等をNICTで主催し、国際研究交流を促進してきた。このような国際イベント開催に際しては事務局運用の経験も成功の可否を握る重要な要素であるが、活動開始の初期からセクレタリとして務めた根津ひろみの実績はNICTのホスピタリティを長期にわたり参加者に印象付けてきた。NICTは、イベント開催に不慣れな他機関に事務局の効率的な運営方法を伝授する等のサポートも行ってきている。

4 国際GNSS事業(IGS)への貢献

米国が運用するGPSに代表される、測位衛星システム(GNSS)の利活用分野は、現在では航法や測位、あるいは測地学にとどまらず極めて多岐にわたり、国際的な共通インフラとして認知されている。このGNSSに係る様々なデータの提供や研究開発を一手に担ってきたのが国際GNSS事業(International GNSS

Service)であり、広く“IGS”の略称でよく知られる組織である[14]。IGSは、国際測地学協会(IAG)の事業として、1994年1月に国際GPS事業“International GPS Service”として発足した。その後、GLONASSやGalileo等の、GPS以外のGNSSの登場を踏まえ、2005年3月に現在の“International GNSS Service”に改称した。IGSが提供する観測点データや衛星軌道情報は、発足以来継続してその量・質共に拡充を続け、2019年現在では世界中に展開された400箇所以上の観測点の連続データ及び最高精度の衛星軌道情報を無償で提供し、IGSの存在意義を確固たるものとしている。ただし、IGSは単なるデータ提供組織ではなく、世界測地系の高精度構築への寄与をはじめ、GNSSを用いた各種科学分野・教育・社会生活への貢献や新たな研究プロジェクトの立ち上げ・推進に大きく関与している。

先にIGSを「組織」とは呼称したが、その実態は世界100か国以上、200を超える大学や各種研究機関のボランティアによる運営であり、事務局を米国NASAのジェット推進研究所(JPL)内には置くものの、独立の設備や予算を持たない。IGS創設時から25年にわたって事務局長を務め、IGSの国際展開に多大な貢献を果たしたJPLのRuth Neilan氏*1に代わり、2018年3月からJPLのAllison Craddock氏が事務局長を務める(2019年6月現在)。

IGSは、国際連合傘下の国際連合宇宙局(UNOOSA)の下に2005年に設立された衛星航法システムに関する国際委員会(ICG)[15]の発足以前の準備段階からの

正メンバーでもある。その設立経緯や組織構成で明らかかなように、IGSは完全な非政府組織であるが、その実績を背景にGNSSを運用する主体であるプロバイダー（例えばGPSであれば米国政府、GLONASSであればロシア政府等）に対する、ICGにおけるIGSの発言力は極めて大きい。

NICTは測地と時間・周波数の双方でIGSと関わってきた。測地分野では、1997年7月より小金井及び鹿島の2か所でIGS追跡局と呼ばれるGPS観測点を運用してきている。この観測の目的は大別して2つあり、その1つ目は対外的な活動としての世界測地系の構築と高精度維持である。全世界400箇所以上のIGS追跡局では毎日の連続観測がなされており、そのデータは世界数箇所のデータセンターに集約され、即日に各センターの匿名ftpサイトで無償公開される。IGSが提供する高精度衛星軌道・衛星クロック情報を用いてこれらのデータを解析することで、国際地球基準座標系(ITRF)として知られる世界測地系構築が実現されてきた。また、小金井あるいは鹿島のIGS点とその近傍のVLBI局(小金井11m局及び鹿島34m・11m局)と地上測量によりつなげることで、世界測地系と天球座標系との高精度変換も可能となっている。

IGS観測局運用の2つ目の目的は、NICT時空標準研究室が行う各種観測の時間・空間の整合性を高精度に保つことにある。先に述べたVLBI観測局の局位置とIGS局との地上測量による結合成果は、1990年代半ばから2000年までの首都圏広域地殻変動観測計画(Key Stone Projectプロジェクト)、その後の地球回転パラメータの準リアルタイム決定、国際時間・周波数比較の高精度化において、VLBIとGPSの双方での継続的な観測が各プロジェクトの達成を側面から支えてきた。

また、時間・周波数の面で言えば、NICTでも1990年代から積極的にGPS観測を取り入れると同時にその高精度化を目指した研究を進めている。特に、IGSとの関係では、1998年からBIPMとIGSの協力によるパイロットプロジェクトにより、IGS観測網に参画した世界各国の標準機関においてUTC(k)を基準とした観測が実現し、これによりIGSにおける衛星クロックオフセット推定の劇的な改善が達成された。この成果は、GPS測地では精密単独測位(PPP)の本格的な利用を促す原動力となった一方で、GPSによる時間・周波数比較の定常運用につながった。2019年6月現在において、IGSから提供される各種データは、時間・周波数分野でのGPSあるいはGNSS解析を通して、国際的な時間・周波数比較のみならず、NICT内部での関係施設間(NICT本部・神戸副局・おおかたどや山及びはがね山標準電波送信所)の時間・周波

数比較を行ううえで、不可欠な存在である。さらに、国際的な研究開発の潮流を見てもGNSSやVLBI等の宇宙測地技術と時間周波数計測分野の連携は今後一層深まると予想され、その意味でもIGSとの連携が重要である。

5 超長基線電波干渉法(VLBI)に関する国際活動

5.1 はじめに

複数のアンテナで受信する信号を干渉させて、天体観測における空間分解能を高める方法を電波干渉法と呼ぶ。それぞれのアンテナで受信した信号を干渉させるためには位相の情報(コヒーレンス)を保存する必要があり、共通の基準周波数信号を受信する複数の電波望遠鏡に分配して観測に使用する。この干渉法を拡張して、共通の基準信号を使う代わりに複数の電波望遠鏡それぞれに高安定な原子時計(水素メーザ原子時計)を使用することで、距離の離れた独立したアンテナ間で電波干渉計測することが可能になった。これがVLBI法である(図4)。VLBIは電波天文学を目的に開発されたものであるが、アンテナ間の信号の到達時間差(群遅延)を高精度で計測する方法が米国マサチューセッツ工科大学(MIT)で開発され[16]、大陸移動や地球の自転運動を高精度で測る宇宙測地技術として大きく展開する。

アンテナ間の距離が離れているほど高い精度で天体の位置や地球回転を計測することができるため、VLBIは本質的に国際共同観測を志向する。地球表面を覆うプレートが相互に運動しているとするプレートテクトニクス理論は、古くは1910年代にドイツの

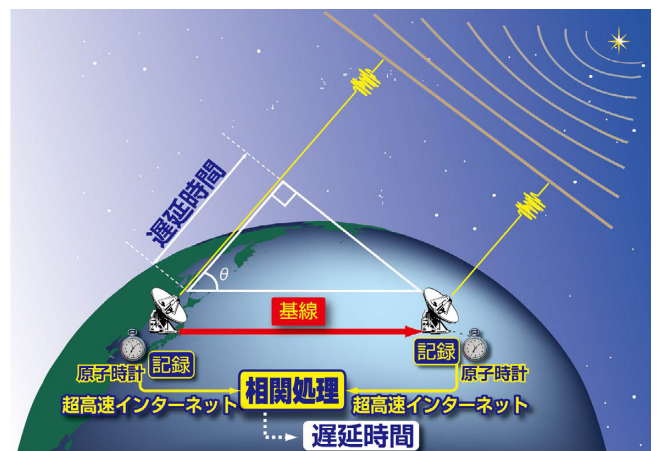


図4 VLBIの観測

*1 因みに、IGS活動を通してのIAGへの多大な貢献が認められ、Ruth Neilan氏はIAGのLevallois Medalを2012年に受賞している。

表 2 地球の自転計測に関する主な出来事

1765 年	Euler が地球の極運動(自転軸の移動)を予測
1899 年	国際緯度観測事業(ILS)の定常観測が開始
1901 年	日本の緯度観測所(現国立天文台水沢 VLBI 観測所)の所長木村栄が Z 項を発見
1962 年	ILS が国際極運動事業(IPMS)に改組
1968 年	鹿島 26 m アンテナ完成
1988 年	国際地球回転・基準系事業(IERS)が設立
2001 年	国際 VLBI 事業(IVS)の設立

Alfred Wegener が提唱した「大陸移動説」を端緒とし、主に 1950 年代以降の海底古地磁気記録や地震のスリップベクトルの解析結果を踏まえて確立してきた。1980 年代に至り、当時の郵政省電波研究所(RRL、現 NICT)は米国 NASA と共同で VLBI 観測を行い、鹿島に対しハワイが年間 6.3 cm の速度で近づくというプレート間運動の直接測定に成功してプレートテクトニクス理論の実証に大きく貢献した。さらに、光学望遠鏡による天体観測で測定されていた地球回転の歳差・章動・極運動・自転速度変動が VLBI によってより高い精度で計測可能となった。1987 年には国際地球回転・基準系事業(IERS)が発足し、VLBI は地球回転を計測する主要な宇宙測地技術のひとつとして IERS に寄与している。日本の VLBI 研究に関する地球の自転計測についての歴史的な出来事を表 2 に示す。

郵政省電波研究所では、1964 年に直径 30 m の大型パラボラアンテナとともに鹿島支所が設置された。1968 年には後に日本の VLBI に大きな足跡を残す 26 m パラボラアンテナが設置され、宇宙通信・衛星放送の研究を開始した。これらのアンテナはまた、東京天文台(現国立天文台)との協力の下、当時飛躍的な発展を始めた電波天文観測にも使われ始めた。一方電波研究所は、日本標準時を維持するため原子時計の開発を推進し、高い安定度をもつ水素メーザ原子時計を開発していた。大型パラボラアンテナと水素メーザ原子時計を組み合わせて誰も測定したことのない大陸の移動や電波天体の精密観測ができる VLBI は、電波研究所の持つ技術を融合した研究として大きく発展した。1984 年から米国 NASA の CDP プロジェクトに参加し、その後 IERS 及び国際 VLBI 事業(IVS、5.2 参照)の中で、観測に参加することはもちろん、VLBI 技術開発センターとしての指名を受けて世界に先駆けた観測技術の開発で世界に貢献してきた。

5.2 国際的な地球回転(UT1)・測地 VLBI の観測的及び技術開発センターとしての貢献

「うるう秒」は、地球の自転に基づく時系 UT1 と原

子時計に基づく時系 UTC のずれを 1 秒以内に維持するため、調整する 1 秒のことである。地球は、月との潮汐相互作用によって自転エネルギーを月の軌道運動に移しており、その自転速度はだんだん遅くなっている。また、地球表層の大気-海洋間あるいは地球内部のコア-マンツルの相互作用の影響を受けて、地球の自転(1日の長さ: Length Of Day)は揺らいでいるが、現在もその精密な予測は困難であり研究が続けられている。1765 年に数学者で天文学者の Euler が地球の極運動(自転軸の移動)を予測し、精密な地球の自転を観測するため、1899 年に国際緯度観測事業(ILS)が開始された。観測手法は星の南中時刻を精密に測定する光学観測で、これに貢献する日本の緯度観測所(現国立天文台水沢 VLBI 観測所)の木村栄所長が Z 項^{*2}を発見した(1902 年)。1988 年に VLBI が IERS の要素技術に組み込まれ、それまでの天体の光学観測から、より高い精度での観測が可能な VLBI に技術が変遷した。IERS においては日本から経緯度観測所の横山紘一氏が 1988 年から 1992 年の間の評議委員を務めている。

この頃の日本において、地球自転も含めて国際測地 VLBI 観測ができるパラボラアンテナは、鹿島 26 m アンテナが唯一であった。VLBI の観測・記録システムから、相関処理・解析までの一貫した VLBI 技術を研究開発する郵政省通信総合研究所(CRL、旧郵政省電波研究所より改称、現 NICT)は、精密な地球の自転観測を目指す国立天文台水沢観測所や、高精度な測量を目指す国土地理院と密接に協力しながら、VLBI 技術の高精度・高感度・安定性を追求した開発を進めてきた。これらを背景として、米国 MIT-Haystack 観測所と共に CRL を「技術開発センター」として指名する手紙が、1990 年に IERS より CRL 畚野信義所長宛に届いている。また、VLBI で長期間精密に測定された鹿島 26 m アンテナの位置は、国際基準座標系に合わせて日本の地図を改定する際に、日本の地図の原点

*2 極運動による緯度変化のうち観測地点の経度の依存しない項。

として採用された [17]。

2001年にIERSは、VLBI・GPS・SLR・DORISの各宇宙測地技術を要素とする組織改変を行い、VLBIの国際組織である国際VLBI事業(IVS)が設立された。NICTからは近藤哲朗氏がIVSの初代運営委員会委員となり、また、IVSのVLBI技術開発センターとしてシンポジウムを毎年開催し、国内のVLBI研究開発の成果を集約してIVS NICT-TDC Newsとして海外の研究機関に情報発信を続けている。TDC Newsは日本のVLBI技術を海外のVLBI研究者に知らせる窓口として高く評価されている。

VLBI技術開発センターとしてNICTが世界に影響を与えたその代表的な成果は、(1)VLBI標準インターフェース(VSI)の制定(ハードウェア、ソフトウェア及びデータフォーマットVDIFの共通仕様策定も含む)、(2)ソフトウェア相関器の開発と展開である。

5.3 VLBI標準インターフェース(VSI)及び共通データフォーマット(VDIF)

VLBIの国際共同観測は、様々な国の電波望遠鏡が同時に同じ天体を観測し、そのデータを併せて解析(相関処理)して初めて観測結果が得られる。しかし一方で、VLBI観測システムの開発機関(MIT-Haystack観測所(米国)、アメリカ電波天文台(米国)、CRL(日本)、国立天文台(日本)、SGL(カナダ))はそれぞれ独自の技術に基づく観測システムを競って開発

していたため、データの互換性は解決すべき重要なテーマであった。2000年、CRLは1ギガビット毎秒の記録速度を持つ観測システムを開発し、それまで先導的であった米国MITの技術と同等以上の技術力を持つに至った。同年NICTで開催された国際会議GEMSTONEの会合をきっかけに、VLBIの標準インターフェースの制定協力が急速に進展し、CRLとMIT Haystack観測所が主導してハードウェアの標準仕様VSI-Hの仕様が標準化された。当時ECLに代わる高速な電気接続仕様として先進的なLVDSがVSI-H仕様に採用されたが、この成果創出にはCRLの中島潤一が大きく貢献した。

2000年代後半には、高速インターネットを通じてVLBIデータを伝送するe-VLBI技術が進展する。2009年1月にガリレオ・ガリレイの観測400年を記念する世界天文年イベントとして、世界中の電波望遠鏡を高速インターネットでリアルタイムに接続し、地球直径の仮想電波望遠鏡で宇宙を観測する実験が行われた(図5)。日本からはNICT鹿島34mアンテナが独自開発した観測システムとデータ伝送ソフトウェアを使ってこの観測に参加し、実験を成功させた。これら国際的なデータ互換の実績と技術力を基礎として、2008年上海天文台で開催された第7回国際e-VLBIワークショップにおいて、ネットワーク上のパケット及び観測システムのファイルとしてのデータフォーマットを共通化するため、世界各地域を代表して米国



図5 2009年1月の世界天文年のリアルタイム VLBI 観測に参加した世界の電波望遠鏡と鹿島 34 m アンテナ

(MIT)・欧州(JIVE)・豪州(CSIRIO)・日本(NICT)から選出した4人を構成員とする議論タスクフォースを立ち上げ、VLBI 共通データフォーマット(VDIF)を制定した。NICTからは関戸衛がVDIF 制定メンバーの1人として参加し、VLBI データのあるべき仕様を提案した。この背景には、観測装置からデータ処理・解析に及ぶ巨大なVLBI システムと一般相対論を含むVLBI 観測理論をすべて網羅して研究してきたRRL、CRL からNICTにいたる技術開発の経験と蓄積がある。

5.4 ソフトウェア相関器の開発と普及

2000年代の後半までは、巨大なデータを処理する本格的な測地・電波天文観測手法のVLBIにおいて、ハードウェアによる専用計算機(相関器)が必須とされてきた。VLBI データの相関処理を汎用計算機のソフトウェアで行う方式は、初期のVLBIの原理実証又はJPLの深宇宙探査機の軌道決定VLBI[18]の狭帯域のデータ処理に使われるのみであった。だがNICTでは先駆的に、高速な演算能力を持ち、急速に大容量化が進展する汎用計算機を使った相関処理にVLBI業界の目を向けさせる世界最先端の開発を進めた。IP-VLBI システムと呼ばれるパーソナルコンピュータを用いてデータ取得から相関処理までを行うK5/VSSPターミナルの提案である[19]。この一環として近藤哲朗の開発した、どのような汎用計算機でも動作する相関処理ソフトウェアの構想と開発報告は、年報であるNICT-TDC ニュースによって世界のVLBI研究者に知られ、世界有数のVLBI研究機関(欧州JIVE、豪CSIRO等)からライセンス提供の要望を受けることとなった。またK5/VSSPとは独立に、NICTの木村守孝が広帯域のデータを相関処理する高速ソフトウェア相関器GICO3[20]を開発した。NICTがソフトウェア相関器の実用性を証明し、広く知られるようになると、豪Swinburne工科大学のA.Deller氏が汎用ソフトウェア相関器DiFXを開発した[21]。DiFX相関器はオープンソースとして公開され、英語圏のユーザサポートのワークショップを定期開催したことも功を奏して世界中に普及した。2019年現在、DiFXは測地VLBI技術開発の元祖であるMIT-Haystackや米国NRAO、欧州JIVEをはじめ、世界中のVLBIデータ処理で使用されている[22]。NICTはまずソフトウェア相関器の流れを作り、DiFX相関器と同等上の性能を持つ高性能なソフトウェアGICO3ソフトウェア相関器を開発したが、Open Source戦略や言葉の壁のクリア、海外を含めたユーザサポート体制の整備など、NICTのソフトが世界中で使われるためには研究開発とは別のマネジメントが必要であった。GICO3は、

国立天文台のFX相関器の後継機としてVERAシステムの相関処理システム[23]に採用され使用されている。また、NICTが開発した広帯域VLBIシステム[24]の相関処理に使用され、大容量のデータを高速に相関処理するために威力を発揮している。

5.5 個々の国際協力、共同研究

IVSにおける国際活動のほかに、個別の国際共同研究には、中国：測地VLBI観測、フィンランド：ギガビットVLBIを使った共同観測、スウェーデン：リアルタイムVLBIによる迅速UT1計測、ロシア：パルサータイミング及びパルサーVLBI位置天文観測、イタリア：広帯域VLBIによる光周波数標準器間の周波数比較など、多くの共同研究が行われてきた。ここではその詳細は割愛する。

6 その他の学術団体への貢献

6.1 国際天文学連合 (IAU)

IAUは、1919年に多くの団体を統合して設立された。分野ごとに分科会(Division)が設けられ、さらに各Divisionには細分化された委員会(Commission)が設けられている。DivisionとCommissionは2人目の会長となった海部宣男氏の下、2012年より大規模な改革の議論が始まり、その結果2015年に大幅な整理が行われたが、それ以前の体制では、NICTやその前身のCRL及びRRLからDivision I(Fundamental Astronomy)のCommission 31(時間委員会)において吉村和幸らが長く会員として参加し、またDivision X(Radio Astronomy)の活動にも多数参加するなどの実績がある。時間委員会では、特に1990年代に時系と基準座標系とを合わせて相対論効果を含めた様々な議論が行われ、2000年に開催された総会において決議された一連のIAU resolution Bシリーズに貢献している[25]。2000年以降は、パルサー時系の構築や原子時系の発展の影響などに活動の比重を高めるとともに、協定世界時のうるう秒問題にもワーキンググループを形成し、報告書を策定するなどの活動を続けてきた。この間、2003年に細川瑞彦がこの委員会のボードメンバーとなり、また2009年には副委員長、2012年には委員長を務めている。2012年、先に述べたDivisionとCommissionの改革議論の中、時間委員会は存続を申し出て、Division Iの中でも様々な議論が行われたが、結果として、2015年の総会終了後からはDivision IはDivision Aと名称を変えた。また時間委員会は、委員会としては廃止され、より具体的な活動目標を定めた作業部会(Working Group on Time Metrology Standards)として再編されることになった。この作

業部会には NICT から細川瑞彦・小山泰弘が参加しており、その初代部会長は、2012 年から 2015 年まで時間委員会の副委員長を務めた元 BIPM の F. Arias 氏が就任している。2018 年の総会時に最初の会合が開催され、各参加機関の天文学に関わる時間標準の活動報告の場となるとともに、うるう秒の問題、光周波数標準と秒の定義改変の問題、CIPM、特に CCTF と単位諮問委員会 (CCU) に対するリエゾンとしての IAU の立場の議論などが行われている。

6.2 国際電波科学連合 (URSI)

URSI は 1919 年に設立された電波、電気通信及び電子科学分野の研究の連絡と推進を図る国際学術団体であり、IAU と同様国際学術会議 (International Science Council) に属している。日本は URSI の設立当初から他の 8 か国とともに加盟しており、NICT の中には URSI と関わりの深い研究分野は多い。URSI には、専門的な分野ごとに 10 の委員会 (Commission) が設置されており、時空標準研究室は電磁波計測 (Electromagnetic Metrology) を扱う Commission A に主に関わるほか、電波天文学の Commission J や、測位などに関連するその他の分野の委員会でも研究発表を行ってきた。URSI は 1922 年に 1 回目の総会を開催して以降これまでに 32 回の総会 (現在は General Assembly and Scientific Symposium を略して GASS と呼ばれる) が開催されており、日本での開催としては 1963 年の東京、1993 年の京都に続いて 2023 年に札幌コンベンションセンターで開催されることが決まっている。1963 年の東京総会の際には、国際的に著名な標準関係者が当時の電波研究所の研究を視察したことが記録に残っており、その後の NICT における時空標準研究の活発な国際的活動へとつながる大きなイベントになったようである [26]。URSI では、総会に加えて 2001 年に東京での開催によって始まった AP-RASC、さらには 2015 年から AT-RASC がそれぞれ 3 年ごとに開催されるようになり、毎年いずれかの国際会議が開催されるという体制になった。NICT は 2001 年の AP-RASC において豪州の計量標準機関 NML と共に Commission A の Convener としてその礎を築くなど、これらの国際会議の開催の際に組織委員に加わり積極的に関わっている。2011 年からは小山泰弘が Commission A の Vice Chair に就任したのち、2014 年から現在まで Chair として Commission 全体のとりまとめや国際会議のセッションの運営を行っている。URSI の Commission A の対象分野は電磁波の計測に関する研究開発全般であり、広範囲にわたるが、逆に他の Commission の対象となる研究課題も多く、結果として時間周波数標準の研究発表が半数

以上を占めて主要な研究対象分野となっている。近年では、光周波数標準の研究開発や、その精密な相互比較などが活発に取り扱われているほか、本特集号 **7-2** で詳しく述べられるうるう秒廃止の是非を中心とした協定世界時の将来問題の URSI における議論もこの Commission が主導している。

7 まとめ

NICT では、前身となる RRL 及び CRL の時代から、時間・周波数標準及び位置基準の構築に関わる国際的枠組みに参画してきた。これらの活動は、関連する枠組みや組織が現在の形に成熟する以前からのものも多く、国際標準を確立する過程に大小の足跡を残してこられたのではないかと自負している。この成果は、関連する研究・業務に携わった先達の長年にわたる努力の賜物でもある。海外の機関から個々人の名を出して謝意を伝えられることも多い。

このような国際的枠組みでの活動は、技術的な議論もさることながら、異なる文化や慣習の中での立場の主張や地道な調整も必要であり、また目に見える成果が出ないことも多く、成果創出に効率の良い仕事とは言い難いかもしれない。だがこのような活動が現在の先端技術を支える基盤であることは間違いなく、世界中の多くの研究者・技術者が多忙な中活動に参加している。我々も、これまでに培った国際社会の信頼と当該分野におけるエキスパート集団としての実力を保ちつつ、引き続き国際活動での貢献を目指していく。

英語略称(フルスペル)：和名

- AIST (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)：産業技術総合研究所
- APMP (Asia Pacific Metrology Program)：アジア太平洋計量計画
- AP-RASC (Asia Pacific Radio Science Conference)
- ATF (Asia-Pacific Workshop on Time and Frequency)
- AT-RASC (URSI Atlantic Radio Science Meeting)
- BIPM (Bureau international des poids et mesures)：国際度量衡局
- CC (Consultative Committees)：諮問委員会
- CCTF (Consultative Committee for Time and Frequency)：時間周波数諮問委員会
- CCU (Consultative Committee for Units)：単位諮問委員会
- CDP (Crustal Dynamic Project)
- CGPM (General Conference on Weights and Measures)：国際度量衡総会
- CIPM (International Committee for Weights and Measures)：国際度量衡委員会
- CIPM-MRA (CIPM-Mutual Recognition Arrangement)：CIPM 相互承

認協定

CMC (Calibration and Measurement Capability) : 校正・測定能力
 CRL (Communications Research Laboratory) : 郵政省通信総合研究所
 CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) : オーストラリア連邦科学産業研究機構
 DI (Designated Institute) : 指名計量標準機関
 DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite)
 ECL (Emitter Coupled Logic)
 GNSS (Global Navigation Satellite System) : 測位衛星システム
 IAG (International Association of Geodesy) : 国際測地学協会
 IAU (International Astronomical Union) : 国際天文学連合
 ICG (International Committee on GNSS) : 衛星航法システムに関する国際委員会
 IERS (International Earth Rotation Service) : 国際地球回転・基準系事業
 IGS (International Association of Geodesy) : 国際測地学協会
 ILS (International Latitude Service) : 国際緯度観測事業
 ITRF (International Terrestrial Reference Frame) : 国際地球基準座標系
 IVS (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry) : 国際VLBI事業
 JCRB (Joint Committee of the Regional Metrology Organizations and the BIPM)
 JIVE (Joint Institute for VLBI ERIC)
 JPL (Jet Propulsion Laboratory) : ジェット推進研究所
 KCDB (key Comparison Database) : 基幹比較データベース
 LVDS (Low Voltage Differential Signaling)
 MEDEA (Metrology-Enabling Developing Economies in Asia project)
 MIT (Massachusetts Institute of Technology) : マサチューセッツ工科大学
 NMI (National Metrology Institute) : 国家計量標準機関
 NMIJ (National Metrology Institute of Japan) : 計量標準総合センター
 NML (National Measurement Institute)
 PPP (Precise Point Positioning) : 精密単独測位
 PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) : ドイツ物理工学研究所
 RCM-LIPI (Research Center for Metrology-Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia) : インドネシア科学院計量研究センター
 RMO (Regional Metrology Organization) : 地域計量組織
 RRL (Radio Research laboratory) : 郵政省電波研究所
 SLR (Satellite Laser Ranging) : 衛星レーザー測距
 TAI (International Atomic Time) : 国際原子時
 TCTF (Technical Committee of Time and Frequency) : 時間・周波数に関する技術委員会
 TCQS (Technical Committee of Quality System) : 品質システムに関

する技術委員会

UNOOSA (United Nations Office for Outer Space Affairs) : 国際連合宇宙局
 URSI (International Union of Radio Science) : 国際電波科学連合
 UTC (Coordinated Universal Time) : 協定世界時
 VDIF (VLBI Data Interchange Format) : VLBI 共通データフォーマット
 VLBI (Very Long Baseline Interferometry) : 超長基線電波干渉法
 VSI (VLBI Standard Interface) : VLBI 標準インターフェース

【参考文献】

- 計量学 – 早わかり (Euramet 文書の翻訳)、EURAMET [著], 産業技術総合研究所計量標準総合センター, 製品評価技術基盤機構認定センター 訳編、NMIJ, 2009. : https://www.nmij.jp/~imco/yougo/PPmetrology_in_short.pdf
- 「メートル条約に基づく組織と活動のあらまし」国立研究開発法人産業技術総合研究所計量標準総合センター, 2017. : https://www.nmij.jp/~imco/metric/aramashi_2017.pdf
- BIPMサイト : <https://www.bipm.org/en/about-us/member-states/jp/>
- BIPMサイト : <https://www.bipm.org/en/committees/cc/cctf/>
- BIPMサイト : <https://www.bipm.org/utis/en/pdf/CCTF-strategy-document.pdf>
- BIPMサイト : <https://www.bipm.org/en/committees/cc/cctf/publications-cc.html>
- BIPM Annual Report on Time Activities volume 1, p.31, 2004.
- BIPM Annual Report on Time Activities volume 1, p.29, 2007.
- FTP server of the BIPM Time Department, Circular T HTML, no.373 [January 2019].
- BIPMサイト : <https://www.bipm.org/en/about-us/member-states/jp/cipm-mra.html>
- BIPMサイト : <https://www.bipm.org/en/worldwide-metrology/regional/>
- APMPサイト : <http://www.apmpweb.org/about/general.php>
- APMPサイト : http://www.apmpweb.org/fms/workshop3.php?tc_id=TF
- IGS web site : <http://www.igs.org>
- ICG web site : <http://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/icg/icg.html>
- Rogers,A.E.E, "Very long baseline interferometry with large effective bandwidth for phase-delay measurements," Radio Sci., 5, 10, pp.1239–1247, 1970.
- 辻 宏道, ほか "鹿島 26 mVLBI アンテナの測地学への貢献," 国土地理院時報, no.103, pp.53–62, 2004.
- Brunn, D. L. et al., "Delta VLBI spacecraft tracking system demonstration. Part 1: Design and planning," The Deep Space Network pp.111–132 (N78-28108 19-12), 1978.
- Kondo, T., et al., "Development of the new real-time VLBI technique using the Internet Protocol," IVS NICT-TDC News no.17, pp.22–24, 2000.
- Kimura, M., et al., "High performance PC Based Gigabit VLBI System," IVS NICT-TDC News no.25, pp.64–66, 2004.
- Deller A. T., et al., "DiFX: A Software Correlator for Very Long Baseline Interferometry Using Multiprocessor Computing Environments," PASP, 119, pp.318–336, 2007.
- Tingay S.J., et al. "Geodetic VLBI correlation in software," J. Geod., DOI 10.1007/s00190-009-0324-3, 2009.
- Oyama T., et al., "New VLBI Observing System 'OCTAVE-Family' to Support VDIF Specifications with 10 GigE for VERA, JVN, and Japanese e-VLBI (OCTAVE)," Proceedings of Seventh General Meeting (GM2012) of the international VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS), pp.91–95, 2012.
- 関戸 衛, ほか, "広帯域 VLBI システムの開発と測地, 周波数比較実験の報告," 測地学会誌, vol.63, no.3, pp.157–169, 2018.
- IERS technical Note no.32, IERS Convention (2003) Appendix A (<http://iers-conventions.obspm.fr/archive/2003/tn32.pdf>)
- 原田喜久男, "開発物語 日本標準時を支える原子標準～水素メーザの夜明け～," 通信ソサイエティマガジン, p.60, no. 21, 2012.

7 時空標準研究室における国際標準化活動

花土ゆう子 (はなど ゆうこ)

電磁波研究所
上席研究員
博士(工学)
時刻・周波数標準、高精度計測

後藤忠広 (ごとう ただひろ)

電磁波研究所
時空標準研究室
主任研究員
博士(工学)
時刻比較、精密軌道決定



細川瑞彦 (ほそかわ みずひこ)

情報通信研究機構
理事
理学博士
時空計測、時刻・周波数標準



市川隆一 (いちかわ りゅういち)

電磁波研究所
時空標準研究室
研究マネージャー
博士(理学)
宇宙測地学、地球物理学



小山泰弘 (こやま やすひろ)

ワイヤレスネットワーク総合研究センター
統括
博士(学術)
宇宙測地、電波科学



関戸衛 (せきど まもる)

電磁波研究所
時空標準研究室
副室長
博士(学術)
超長基線電波干渉法(VLBI)



根津ひろみ (ねづ ひろみ)

電磁波研究所
企画室
参事
国際連携強化



井戸哲也 (いど てつや)

電磁波研究所
時空標準研究室
室長
博士(工学)
光周波数標準、光周波数計測



小竹昇 (こたけ のぼる)

電磁波研究所
時空標準研究室
主任研究員
時間・周波数標準

伊東宏之 (いとう ひろゆき)

総務省
国際戦略局
技術政策課
技術企画調整官
博士(理学)
周波数標準、レーザー分光

藤枝美穂 (ふじえだ みほ)

電磁波研究所
時空標準研究室
主任研究員
博士(理学)
精密時刻比較、光ファイバ周波数伝送