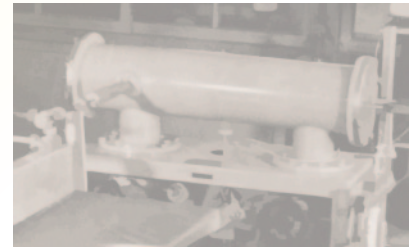


開発物語

日本標準時を支える原子標準

～水素メーザの夜明け～



独立行政法人 情報通信研究機構 原田喜久男
Kikuo Harada



まえがき

周波数標準に関しては、組織の変遷と多彩で長い精度・確度向上の80年を越す歴史がある。ここでは、まず標準電波という言葉が現れた時期から原子標準に至るまでの組織上の変遷並びに背景について述べる。次いで標準電波・周波数標準の始まりとなる、水晶標準を含めて、原子周波数標準がNICT^[1]の前身時代においてどのような展開で研究・開発されてきたかを語っている。ただその対象は水素メーザ(MASER: Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation)開発時期までとし、研究現場から得た情報と体験の記述に留めた。水素メーザ発振時期以降目まじしい進歩を続けている現状については、歴代の原子標準確度を図8の一覧に示して紹介した。



背景

■ 夜明け前

2011(平成23)年7月26日、NICTは、光格子時計により東京大学と連携協力して6,500万年に1秒(10^{-16})の精度を世界で初めて実現したことをプレスリリースした。時を知るために、古来人類は生活・学問などに必須で切実な要求を満たすため、その時々々の自然現象から、また約1600年以降からはいろいろ工夫⁽¹⁾(図1)を凝らして、種々の形で実現し現代に至っている。1920年代には無線通信機利用が盛んになり混信を避けるため、基準となる物指しの必要性を痛感するようになった。そこで国際電気通信会議準備技術委員会(CCIR^[2]の前身)は、周波数の世界共通標準を実現することの重要性を認め、早くも1921(大正10)年6月にはパリにおいて国際周波数標準器設定の必要性を提案し、論議している。周波数標準設定問題の始まりである。

我が国においては、これを受けた形で1922(大正11)年、文部省の学術研究会議内に通信省、陸軍、海軍、民間も

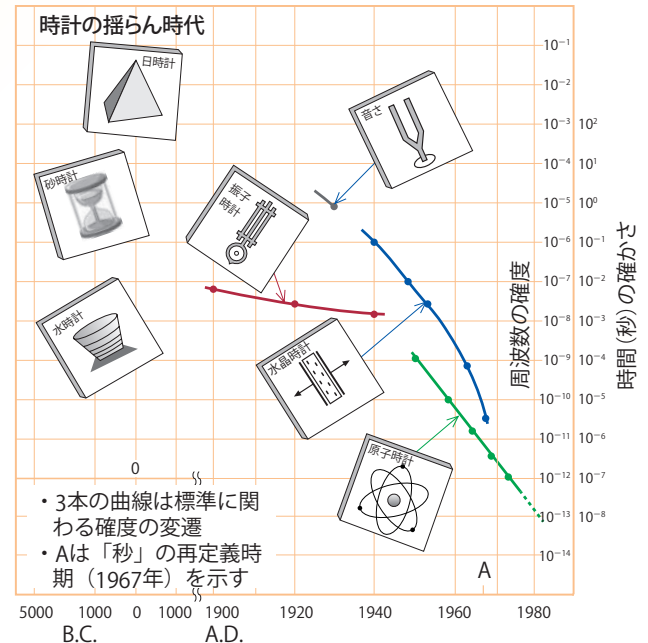


図1 セシウムによる秒の定義が行われるまでの時計の変遷

参加して電波研究委員会が設立され、国家プロジェクトとしてまとまる機運が見えた。

■ 薄明かり

1949(昭和24)年、小金井から標準電波を出した諸先輩の言い伝えによれば、困難な一元化が解決に向かい通信省がその先べんを付けることができたのは、通信省通信局網島毅^{*1}技師の影響が大きい。すなわち、増大する電波のふくそうを処理するための尺度には、標準電波が極めて重要であることに着目して、学会等で活発に発表^{(2),(3)}し、通信省の技術レベルの高さが認められてきていたこと、及び上司との綿密な協力の下、無線界各分野へこの問題に対する積極的な啓発を行ったことが挙げられる。次いで1940(昭和15)年1月通信省告示第一号により公式に標準電波が発射されたことは更に大きく影響している。

*1 網島毅: 元通信省電波局長, 電気通信省電波監理長官, 総理府電波監理委員会委員長

■ 標準電波と周波数標準^[3]

その頃、周波数 f はサイクル/秒 (c/s) で表していた。したがって、正確な基準となる周波数は確度の高い「秒」が安定して得られないと決定できない。

「秒」の決定は文部省東京大学天文台の所掌^[4]であった。この点を重視しながら、総合施設の建設問題が種々検討された結果、場所は東京都北多摩郡小金井町小長久保（以下、小金井）に決定（1948（昭和23）年）した。

途中、終戦を挟むが、1950年頃までの建設現場は、図2でその片りんが伺えるように、周辺は栗林と一面畑の中に農家が点在するといった、村から町になって間もなくの人口一万足らずの場所であった。

当時、電波標準所といわれていた職場は、「秒」の安定供給が受けられるように、三鷹の天文台との間に秒信号伝送のため約10kmの専用線を設けていた（1948（昭和23）年）。この専用線で決められた時間に秒信号を受け、その信号と標準所で発生する標準周波数から作る秒信号とを紙テープの信号記録上で比較して周波数の精密比較をしたものである。これを絶対測定と称した。

夏ともなると秒を受信する専用の鉛被ケーブルが虫害・落雷に遭い、絶縁不良となる。このために秒信号が途絶えるとその度に、線路障害箇所測定法によって鉛被線上に傷口の見当を付け、後は電柱間に張ったメッセンジャにぶら下がりながら落雷箇所を目視で探し出して修復するような仕事もあった。このような環境で測定精度をミリ秒の桁にするのは容易ではない。その頃こんな仕事もこなせる技術者は標準器、送信機、電力の仕事関連も含め10数名であった。それぞれ戦後の食糧難と戦いながら、また空襲で爆弾・焼夷弾などに追い回されて知識習得もままならなかった20歳台前半の若者たちが頑張った。振り返れば素朴ともいえる水晶標準初期（1950年代）から関係者のたゆまざる努力によって周波数測定法の改善と確度の向上が図られた。しかし標準周波数の確度が向上するにつれて、秒のふらつきが問題になり、後々原子周波数標準が現れて天文観測による「秒」からの脱却^{[5] (4)}が実現する（1967（昭和42）年）まで10年以上もの間周波数（時間間隔）と秒の定義に関する議論が世界中で続くのである。

図2は、我が国の本格的な水晶標準時代が始まり、アンモニア吸収形原子時計から水素メーザまでの開発が行われた場所である。1949（昭和24）年から1977（昭和52）年12月1日まで、標準電波もこの地から発射された。

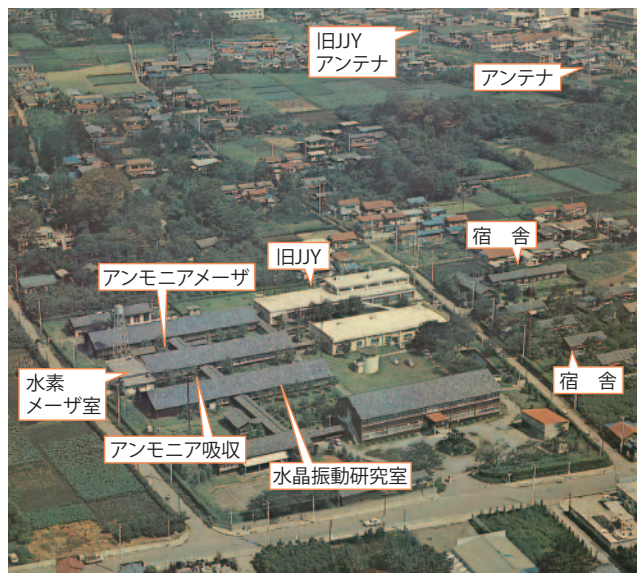


図2 小金井市緑町俯瞰図（1971（昭和46）年）
（提供：情報通信研究機構）〔現在は都立小金井北高校〕

■ 戦後、体制への二大危機

一方、標準電波にとっても重要な要素である電波の伝わり方に関する研究は、従来文部省管轄で電波物理研究所の所掌となっていた。1945（昭和20）年に太平洋戦争が終結して、連合軍司令部 GHQ の命令により電波観測研究の厳しい報告を求められた。電波物理研究者たちが戦中困難を克服しながら命を懸けて測定して、身を挺しても守りたい貴重なデータが没収廃棄の憂き目に遭わないようリヤカーで諸所に分散する処置をした。ひいては組織の存廃にも関わる危急事態も考慮して、当時研究の第一線にあった、河野哲夫^{*2}、青野雄一郎^{*3}、中田美明^{*4}の各氏は対応に大変な苦勞をしたようである。GHQ の厳しい報告検討と視察が行われた結果、電波物理研究所（現、NICT の前身）の研究成果はレベルの高さが世界的であるとの認定があり、国際的に貴重な研究として継続できることになった。これは連合国側（米、英、仏、ソ等）電離層専門官との信頼感及び電波物理への理解と見識に負うところが大きかったようである。

これで戦後第一次存亡の危機は乗り越えられたが、その後、GHQ の介入があって、省庁を横断した電波監理委員会（1950（昭和25）年）の創設・廃止、電気通信省、逓信省、郵政省等組織体制が何度も変わるといふ紆余曲折があった。その中で GHQ の勧告もあり、電波物理のような

* 2 河野哲夫：第4代電波研究所長

* 3 青野雄一郎：電波研究所次長

* 4 中田美明：電波研究所特別研究室長

研究は新しい電気通信業界の研究面から見て不要であるとの強力な意見が出た。第二次の存亡の危機となって上田弘之^{*5}、青野雄一郎、河野哲夫、松尾三郎^{*6}の各氏が代表して時の通信省電波局長へ国家的見地からの重要性を直訴した時期⁽⁵⁾もあった。この事態はかえって行政の研究開発意識へ好影響を与えたようで、電波の伝わり方、周波数標準、電波通信機器検定三体制の研究部門は1952(昭和27)年8月1日、まとめられ郵政省電波研究所(RRL)となった。

この三体制合一は周波数標準のみならず情報通信の研究全般への総合力の増進となり、諸々の情報通信研究の促進に大きな貢献をしてきた。このことを勘案すると、網島長官(1946(昭和21)年通信省電波局長)、初代電波研究所長 甘利省吾博士他の行政担当官、電波研究所の組織運用・研究管理に大きな功績のあった第3代所長 上田弘之博士(1965(昭和40)年電波監理局長)他先輩方の施策は、必ずしも時流とかけ離れてはいなかったのでは、と思われるてならない。



標準への体制固め⁽⁶⁾

■ 周波数標準組織の進展

周波数標準の物指しとしての確かさへの要求が国の内外で高まってきた中、その総合施設の体制強化のため当時一係であった通信省電波局観測課標準係へ約10人の若い新卒の人材が投入され、事務部門を含めて50数人の大世帯となった。指導者松本喜十郎^{*7}氏は網島毅門下の俊秀であり、戦前からこのプロジェクトに精通して実務を遂行してきた行政畑の勝れた技術者であった。管理者として若い人を生かす絶妙な人員配置をして間もなく、90人を超す課に増員される標準課の課長として総合施設完成の基礎を作った。すなわち水晶振動子の研究開発、標準発振器回路の研究、それに続く原子標準の研究並びに長・短波帯標準電波発射の諸体制を確立した。

その体制の中、研究開発をリードした人々は前期水晶発振器からアンモニア吸収形原子標準まで長竹孟^{*8}氏、水晶発振器及び精密測定のカズキ行康^{*9}氏、宮島貞光^{*10}氏、水晶振動子研究開発に没頭した蛭田饒^{*11}博士、また原子標準の研究開発に一生を捧げた佐分利義和^{*12}氏であった。

*5 上田弘之：第3代電波研究所長

*6 松尾三郎：元日本電子開発社長

*7 松本喜十郎：元監視技術課長、中部日本放送技術局長

上部組織は前記のように大危機の乗り越えが再度あって名刺の取換えが忙しかったが、幸い現場では大きな混乱はなく、新しい組織、郵政省電波研究所の中では一時期100人を超すマンパワーが1課2研究室の部を構成して研究開発と標準電波業務を分担し総合的な進展を図った。

また、研究プロジェクトを進める過程では先駆けを心掛けるとともに、委員会などにおいて学識経験者、大学、メーカーの研究者の方々に種々御教示・助言を頂き、また共同研究の提案もして研さんに役立てた。

■ 周波数標準器の先駆け

1928(昭和3)年、日本で最初に周波数標準器として採り上げられたのは音さ式で安定度は 1×10^{-5} 以内であったという。しかしながら、1945(昭和20)年代からは、音さ発生周波数の安定度では、戦後の「西欧の技術へ追いつけ追い越せ」という時代の要求や電波規制の物指し役、ひいては国際水準に沿えなくなってきた。また輸入技術の導入による周辺技術の向上と新しい画期的な発明(1948(昭和23)年トランジスタ)等とが両々相まって、 2×10^{-8} を当面の目標とした、精密加工が必須の水晶振動子を使う高安定水晶発振器の進歩発達が促された。

■ 水晶標準とCCIR 勧告との追いかけてこ

そのような確度向上の過程では、ある課長が確度の桁を分かりやすく説明する例えに富士山の標高測定を挙げたことがあった。高さ3,700mを測って紙(0.1mm以下)の厚さより薄い0.037mmの誤差が 10^{-8} 相当である、と説明をしたところ、高官から、そんなに精密な桁ばかり追い求めて何になる、という批判を浴びる局面もあった。

しかしながら、実生活との落差は別として、周波数の確度についてCCIRは既に1948(昭和23)年には 2×10^{-8} を勧告していた。この時点では残念ながら我が国では 1×10^{-7} の水準にあった。勧告を満たすのは5年後の1953(昭和28)年である。

ほっとする間もなくCCIRは、1959(昭和34)年には標準電波確度 5×10^{-9} を勧告している。向上を求めるユーザや国際情勢はこの値でも満足せず、更に高い数値が求

*8 長竹 孟：企画部長

*9 村主 行康：総合研究官

*10 宮島 貞光：通信機器部長

*11 蛭田 饒：電波研究所特別研究室長

*12 佐分利義和：元電波研究所総合研究官、アンリツ株式会社理事

められた。このような情勢に対応して水晶発振器の更なる確度向上を目指し、水晶振動子、発振回路両面からの精力的な研究開発が進められた。

振動子の性能向上のためには、その支持方法の工夫が重要である。その一方法として、支持線となるりん青銅を時計旋盤で整形する試みがあった。結構難しい工作を科学研究所（現、理化学研究所）に出張して作業することになった。難渋しながら工作していると、様子を見て興味があったのか、のぞき込んだ人がいた。周辺の人から教えられて、その人は原子物理学の泰斗^{たいと}、仁科芳雄博士で、終戦前は通信院電波局長であった人と分かり大感激を味わった。博士は当時生涯かけて研究開発した原子物理学研究に欠くことのできない、世界的規模のサイクロトロン関連施設一切の機器を、GHQ 進駐直後その命令で東京湾の藻くずとされ、失意のどん底にあったと思われるが、そのことをみじんも感じさせない明るさに接したことは印象深い思い出である。支持線工作は実験段階で終わったが、このような優れた人々との出会いがある度に、以後の研究生活の糧となったように思われてならない。

さて、郵政省で決めた温度係数の小さい水晶振動子は国内では未経験の技術・工程が必要で英文の文献による他はなかった。当時は、手に入れる術のない文献を唯一閲覧できる進駐軍の日比谷図書館まで書き写しに行ったものである。蛭田係長は、解説役でかつ成果実現の責任者で、具体策が氏の頭脳から次から次へと出てくるシステムになっていた。

詳しい工作法は省略するが、希望の面の切出しと研磨が終わると切断面を確定するため特別にあつらえた X 線切断角測定装置にかけることになる。試作機の悲しさ、漏えい X 線が思いの外大きかったため、鉛ゴム等で対応したはずが十分でなく、白血球の異常変化を招き、休養のやむなきに至った。このときの医者は「これには特効薬はないので、まあレバーでも食べてしばらくお休みにしなさい」との御託宣であった。いまだ余り豊かな感覚は持てない時機ながら大らかなものであった。しかし急拠 X 線検出器を備えた。時間に追われる新しい開発工程ではやむを得ない実情もあるが、事前の予防体制施策が重要であることは論をまたない。

一方、発振回路の研究開発においては、回路並びに恒温槽に究極の改良が加えられ水晶・回路開発両々相まって、周囲温度に 10℃ の変化があっても $\pm 5 \times 10^{-11}$ の安定

度を示す発振器が開発された。その結果、標準電波確度は 1967（昭和 42）年には 3×10^{-11} に向上した。しかしその値を達成するためには定評のある発振器を数多く集め、それらを総合して真値を求めることが必須であった。この手法を適用するための水晶発振器には好評な輸入品も含め定評のある発振器群を構成するが、一旦電源が切れた場合、再現性は 1×10^{-10} 止まりであった。



マイクロ波への道

■ 原子標準への幕開け—アンモニア原子時計の開発—

かくて水晶振動子による確度向上はもはや限界となったのであるが、科学技術の進展は更なる精度・確度の向上を必要としてきた。時あたかも米国においては 1934（昭和 9）年からの研究実績が実を結んで 1946（昭和 21）年、アンモニアのマイクロ波スペクトルの比較的強い超微細構造が検出されたのを契機として、米国の国立標準局 NBS（National Bureau of Standards, 現 NIST）は、そのマイクロ波吸収周波数（23.8 GHz）による、アンモニア（NH₃）吸収形原子時計を研究発表した（1949（昭和 24）年）。これは非常に衝撃的なニュースで、佐分利義和氏は「この発表は、当時天文時に頼らざるを得なかった周波数標準の関係者に強烈な衝撃と大きな希望を与えてくれたニュースであった」と述懐していた。

我が国が原子標準の道を進むきっかけは、戦後初めて出席できるようになった国際高周波放送会議（1948（昭和 23）年メキシコ）に参加した網島毅電波局長（GHQ が特命した非公式参加）が、帰途の 1949（昭和 24）年に日本政府と GHQ の指示により、NBS でできたばかりのアンモニア原子時計を視察され感銘を受けたことが始まりである。帰国後直ちに当時標準担当の部下であった松本喜十郎課長に研究開発の指示を出した。もはや水晶の時代ではなくなることを現地で実感したようである。

これがきっかけとなり 1951（昭和 26）年文部省の総合研究で取り上げられ、大学の工学部・理学部、マイクロ波関連メーカー、天文台、電気試験所なども加わり、延べ 9 年にわたる「原子制御精密周波数標準」委員会が発足した。また同じ時期通信省は原子時計研究に関する諮問を出している。電波研究所はその先頭に立って研究を進めた。

しかしながら、標準電波建設所が発足した時代（1941（昭和 16）年）から、原子標準の開発に取り掛かった 1950（昭

和 25) 年代までは、前述の図 2 で推察できるような環境の中に木造の素朴な施設があるのみであった。

■ 短波からマイクロ波への苦闘

さて、アンモニア原子時計に必要な吸収線周波数 23.8 GHz を 100 kHz から通倍して作ろうとしても整数倍ではないし、工夫して合成周波数を作ろうとしても雑音に埋もれて信号にならなかった。そんな苦闘の中、情報・材料収集体制の打開を図り、アンモニア吸収形原子標準の開発に必要な米軍放出の 300 MHz 帯の発振器や X バンドのクライストロン、通倍用の鉱石検波器、24 GHz 導波管等は秋葉原に足を運んで調達した。23.870 GHz は作られたが、なお雑音による位相変動⁽⁷⁾が大きく測定には難渋した。

何とか工夫して測定ができたところに塚田十一郎郵政大臣の視察(図 3, 1958 (昭和 33) 年)があって開発意欲が高揚した。当時上司の照会によれば、米国標準局(NBS)の原子時計はアンモニア吸収用の 24 GHz 導波管が円形の大きな時計の周りに巻き付いた形になっていて、マイクロ波現象と時計の結び付きを暗示してデモ用には満点の整え方であったそうであるが、大臣は木造の建物の中の素朴な実験現場を熱心に見入っていたことが印象に残っている。

1954 (昭和 29) 年には国産の進行波管が使えるようになって吸収周波数の精密測定ができるようになった。しかし、吸収の中心周波数を精密につかむには吸収線の幅がもっと狭いことが望ましいこと、導波管にアンモニアを封じ込めると導波管の周波数特性に依存する誤差が出ること、吸収線自体がアンモニア圧力変化や他のガス混入などでシフトしてしまうことなど、連

続運転できてしかも確度の高い標準器としては問題が残った。これらを克服すれば究極 2×10^{-9} まで達成できたという報告もあるが、簡便には得られない。この装置の共同開発に携わったメーカーに伺ったところ、導波管にアンモニアを封じ込めてそのサンプルを複数作り、吸収ラインのシフト量の緻密な測定を続けて徹底した追究をしていた。既に電波研究所ではメーザが本命として開発を進めていた時期だけに深い感銘を受けた。

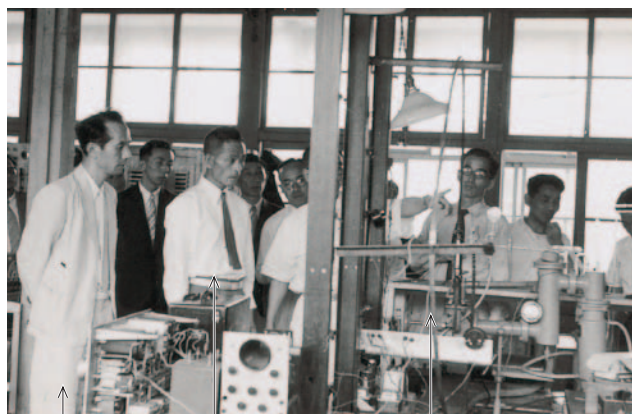


メーザ開発物語

■ アンモニアメーザ開発とその同時代のイベント

図 4 はアンモニアメーザ 1 号である。佐分利氏は原子周波数標準の研修のため電波研究所(RRL)から出向していた 1956 (昭和 31) 年に、東大理学部教授霜田光一博士の研究室で我が国最初のアンモニアメーザの発振⁽⁸⁾を目の当たりにした。実験の得意な佐分利氏は吸収形標準より発振形標準が優位になるとし、図 4 に示す各部の構成を手早くまとめ、翌年 1 月には発振に成功、確度 3×10^{-9} を達成した。この時期から運用と開発を共にしたが、メーザは短期間に次々改良され、確度 1×10^{-10} を達成できたため CCIR 勧告(1959 年)標準電波の確度 5×10^{-9} を十分校正することができて、9 月からはメーザを一次標準として標準電波 JJY^[6]の周波数偏差値を学会誌、諸機関誌に公表することになった。ここで周波数標準と標準電波との役割分担が決まった。

その後メーザは何回も改良を重ね、最終的には油拡散ポンプを卒業し、イオンポンプを採用して残留ガスによるスペクトルのシフトが少なく、スペクトルの幅が狭く



甘利省吾 初代所長
塚田十一郎 郵政大臣
アンモニア吸収形標準用 24G 導波管

図 3 大臣視察の様子(提供:情報通信研究機構)

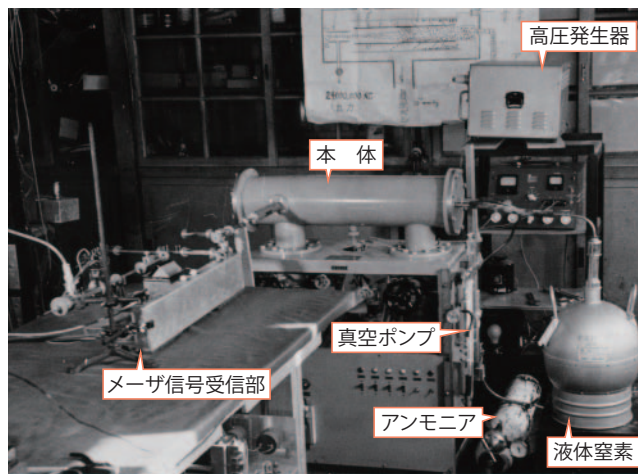


図 4 アンモニアメーザ 1 号の写真(提供:情報通信研究機構)

て精度の上がるダブルビームメーザ^{[7], (9)}が開発された。この装置によって精度は 5×10^{-11} となり、周波数絶対値は22,834,185,037 Hzであった。

このような成果が得られ、我が国でも天文観測による「秒」からの脱却ができたわけであるが、まさにタイミング良く1963（昭和38）年9月、日本でURSI (Union Radio-Scientifique Internationale, 国際電波科学連合)の総会（URSI-Tokyo）が開かれ世界中の学者・研究者が参集した。この総会の標準関係のコミッションで原子標準による秒の定義勧告が行われたこともあり、40数名に上る著名な周波数標準関係者が大挙して古めかしい木造建築の標準庁舎に参集した。こんなところに水晶振動子、メーザ装置の開発から標準電波の発射まで一貫した標準施設があるとは思っていなかったらしく、電波研幹部^{*13}をはじめ第一線研究者の熱心な説明に一心に耳を傾けていたのが印象的であった。

中には当時URSIのリーダーでもあったパリ国際報時局(BIH)のデュコー、英国国立物理研究所(NPL)のエッセン、西ドイツ物理工学研究所(PTB)のベッカーらの参加もあり、後にも先にもこれほどの錚々たる外国の標準関係者が一時に訪れた例は記憶にない。RRLの名を一挙に世界的に広める絶好のイベントとなったように思われた。

ところでアンモニア標準の泣き所は、立上げに真空度を上げるための時間がかかること、連続運転に弱いこと、運転終了時にアンモニアの消臭処理を要することである。一番の難点である連続運転を佐分利氏と徹夜で試みたことを思い出す。結局ビーム形成のための電界に使用する高電圧電極がアンモニアの霜で絶縁破壊して一巻の終わりとなり、40時間が限度であった。連続運転終了後にメーザ装置内に蓄積した解凍アンモニアの処理が大問題であった。

連続運転と後始末という難を補うことを期待して連続運転が可能なアトミクロンという商用セシウム標準を輸入(1962(昭和37)年)することになり、佐分利氏と税関にドライアイス持参で受取りに行ったことを思い出す。温度が上昇しセシウムが流れ出すのを防ぐためであったが、早くも取扱いの困難を予感させるものがあった。苦勞して入手した割には今一つ手のかかる代物で、吸収現象の発生・受信を司る電子回路のうちシンセサイザ部分が弱く使用するたびに9,192,631,770 Hzを発生させるため、入念な調

整が必要であった。National Co. (USA) から派遣されたサービスエンジニアの手に負えず、その度に筆者が「Mr. Synthesizer」といって呼び出される始末であった。

この装置はその後改良形が出ているが、米国ヒューレット・パッカド(HP)社から更にコンパクトで高性能な商用セシウム標準が売り出されこのタイプが導入された(1965(昭和40)年)。この装置も絶対値確定には3日に1回アンモニアメーザによる校正を要した。

■ HP社商用セシウム原子時計導入

HP社商用セシウム原子時計⁽¹⁰⁾は米国以外でもRRLをはじめ欧州でも信頼性が高かったので、国内でも高度な時刻測定を要する機関、東京天文台、水沢緯度観測所、国土地理院などが次々導入した。米国では海軍天文台(USNO)がこれを重用して世界中の時刻同期実験データの収集に努めていた。

HP社原子標準時計の移動にはジャンボ機を使ったのでフライングクロックと称した(1965(昭和40)年)。余談になるが、時計はUSNOの一次標準器で校正した値を保持して世界中を飛び回っていた。ジャンボ機で運ぶ際

表1 1965年頃の原子時計の研究開発 種類と特性

ガスの種類	使われ方	寿命(時間)	安定度	再現性
¹⁴ NH ₃ アンモニア	ガス分子のマイクロ波共振			2~3×10 ⁻⁹ ~
	メーザ	8~50 ^{*1}	1×10 ⁻¹⁰ ±3×10 ⁻¹⁰	±1×10 ⁻¹⁰ ±3×10 ⁻¹¹
¹⁵ NH ₃ アンモニア	ガス分子のマイクロ波共振		研究用	
	メーザ		スイス(研究)	±2×10 ⁻¹¹
¹³³ Cs セシウム	原子ビームのマイクロ波共振	4,000~10,000 ^{*1}	±1×10 ⁻¹¹	≤10 ⁻¹² (研究) ^{*3} ≈1×10 ⁻¹¹ (HP)
	光ポンプ法による吸収		1×10 ⁻¹¹	研究段階 RRL(日本) 米国
²⁰⁵ Tl タリウム	原子ビームのマイクロ波共振		研究中 スイス, 米国	±2×10 ⁻¹¹
⁸⁷ Rb ルビジウム	光ポンプ法による吸収	20,000~30,000	5×10 ⁻¹³ 短時間 5×10 ⁻¹¹ 1年	±1×10 ⁻¹⁰
	光ポンプ法によるメーザ		研究中 米国, カナダ, 日本	
H水素	メーザ	~10,000 ^{*2}	1×10 ⁻¹³ 短時間 5×10 ⁻¹³ 1月	1×10 ⁻¹²

*13 電波研幹部 湯原仁夫：電波研究所所長
村松金也：同標準課長，郵政省監視技術課長

*1 一回に使える時間 *2 一例 *3 英, 米, 独, カナダ
出典：実用電気時計総攬(下巻), p.100, 精密工業新聞社, June 1967より

に原子時計と呼ぶと危険な印象を与えるので、乗客名簿には Mr. Cesium Clock と登録されて座席一人分を占有したと小金井に飛来訪問のとき語っていた。

この装置は RRL が国内では最も早く導入して運転経験も長かったので、後発の国内ユーザから調整・校正について相談を受けることもあった。

セシウム標準といえばビームでなくガスセルによる尖锐な吸収線を使った実験も行われ後のルビジウム・ガスセル標準の開発につながっている。このタイプの標準は 1967 (昭和 42) 年電気学会に技術専門委員会が設けられ、RRL が中心となって東京工業大学、計量研究所、富士通、日本電気、精工舎が参加して国産化のためのそれぞれの装置を製作した。3 × 10⁻¹¹/月程度のドリフトはあるが、セシウムよりはるかに安価な装置となった。これは時報を出すための信号源を水晶から原子標準へ切り換えるとして民放各局で相次いで採用されるようになった。この時点で行われていた原子標準開発に関する一覧を表 1 に示す。

■ 水素メーザ 1 号

アンモニアメーザの後、RRL の一次周波数標準として精度・確度を上げていくためには、当時実現の可能性で双壁と見られていたセシウム標準と水素メーザのどちらを選択するかは当時の RRL 最高幹部間で熱烈な議論があった。結果、安定度の抜群に良い水素メーザの開発が選ばれた。

水素メーザは、図 5 の原理説明に示すように、大別すると水素原子発生源、集束磁石、空洞共振器からなる。発振の原理は、図左から、①純化して適切な圧力にされた水素分子 H₂ が、②水素放電管に導かれて原子 H をつくる。発生した H は原子だけ通す③コリメータ (細隙)⁽¹⁰⁾ 出力で原子ビームを形成し、④6 極マグネットを通過する過程で、発振に寄与する H は⑤集束され、寄与しない H は外向きに曲げられて発散する。集束された水素原子 H は⑥選ばれた原子の流れとなって⑦ストレージバルブ (原子蓄

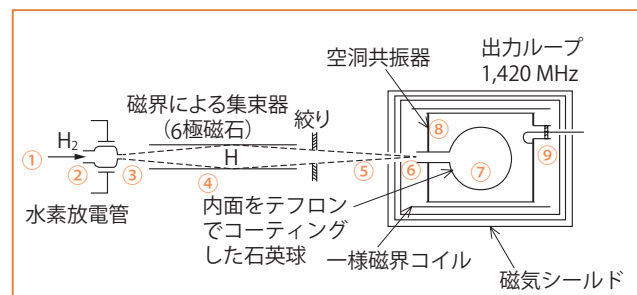


図 5 水素メーザの構成

積球) に⑧導入され、テフロンでコーティングしたバルブ内に約 1 秒程度滞留する。

その間に空洞共振器のマイクロ波磁界との相互作用が行われて固有周波数は増幅され、有効な寄与原子が次々供給されて共振器の損失を上回れば、発振に至る。

発振出力は⑨ループアンテナから取り出す。発振出力は 1,420,405,751.777 Hz で安定度は 3 × 10⁻¹⁴/200 秒、再現性は、1 × 10⁻¹¹ であった (1967 年)。周波数は定義に従い ¹³³Cs の周波数を 9,192,631,770 Hz としたときの値である。

「もはや戦後ではない」と言った首相がいたが、当時はまだ工業水準も開発途上のところがあり、欧米においてもいまだ研究段階にあるような技術は暗中模索で、少ない情報によって作られる仕様から成果を目指すわけである。水素メーザを装置としてまとめるためには発注先の日本電気とも共同で開発研究しなければ具体化できないこと、またキーになる材料がメーカー直接では入手困難なことも出てきて予算不足が心配された。

メーカーにはマイクロ波ハードウェアの構成をしっかり頼んだ甲斐があり、とりわけバイコールのキャビティと水素原子のコリメータは高い評価が得られた。筆者は文献等の調査や霜田先生をはじめ諸先生方に御教示を頂き、また国内では初めての材料、例えば 6 極 1 万ガウスのマグネットは直接仙台まで出張して試作 (東北金属) の依頼に行った。また各サイズの石英フラスコ状の原子蓄積球は、種々の大きさのものの製作を引き受けるメーカーを探す必要があった。このようにして発振への仕様固めと各部の基礎実験が可能になった。次に皆で協力し合っても難儀な工程はストレージバルブへの原子線導入であった。

メーザの発生は、前述のように発振に寄与する原子がバルブの中に有効にとどまれるよう各部の精巧な調整が必要である。収束された原子が正しく導入されるように調整するには、バルブ入口の位置に酸化モリブデンを吹き付けたガラス板を置いて、高真空状態で原子を流す。ガラス板上の酸化モリブデンが還元して 6 極磁石の形をきれいに映し出せれば、原子がバルブへ導入される位置が決まる。この手法で決まったバルブ位置を中心に各部を精巧に組み立てるにはクレーンを駆使する。再三組み立てては分解 (図 6)、更にも組み立てて水素原子を導入する実験を試みるが、なかなか発振に至らない。

形のとおり皆で組み立てを繰り返した末のある土曜日、

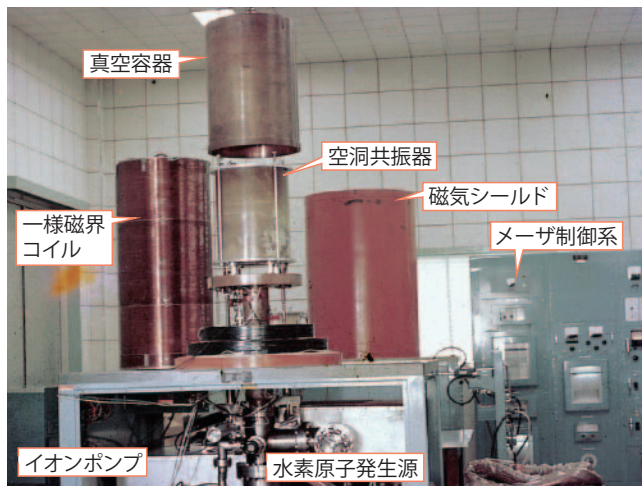


図6 水素メーザの分解（提供：情報通信研究機構）

いつもの日課ようになっていた発振兆候の観察をやめ、真空度の上昇も時間を要するので一同解散した。だがなぜか筆者は心残りで一人しぶとく残り、高真空も得られたので水素原子を流し励振しては波形の無常な減衰を半ば諦めながら観察していた。

ところが、何とブラウン管に減衰しない発振波形らしいものが現れているではないか。半信半疑の筆者は興奮しながら確認し、遅い昼食のため宿舎に帰っていた佐分利氏に急報して発振したばかりの水素メーザ出力で水晶発振器を位相同期し、小躍りせんばかりに喜び合った。生涯忘れ得ない思い出の日時は1966（昭和41）年6月24日午後1時40分の出来事であり、米、スイスに次いで3番目の快挙となった。

図7はそのときの原子標準室のたたずまいで、水素メーザで共に戦った人々は佐分利部長以下、小林正紀^{*14}研究室長、安田嘉之^{*15}主任研究官、吉村和幸^{*16}研究官、中桐紘治^{*17}、緒方稔^{*18}、太田安貞^{*19}、渋谷政昭^{*20}の各氏と筆者がその感激を味わえた。後には主として太田安貞、森川容雄^{*21}、中桐紘治の各氏らが各部の開発研究を続けて研さんを積み、発振初期の再現性と安定度は1967（昭和42）年には再現性 5×10^{-12} 、安定度 3×10^{-14} に向上した。安定度は更に1978（昭和53）年には 6×10^{-15} に到達している。

メーザ装置は、現在も周波数標準決定の一翼を担う装

* 14 小林正紀：原子振動研究室長
 * 15 安田嘉之：周波数標準部長
 * 16 吉村和幸：通信総合研究所長
 * 17 中桐紘治：原子標準研究室長，近畿大学教授
 * 18 緒方 稔：研究官
 * 19 太田安貞：主任研究官
 * 20 渋谷政昭：主任研究官
 * 21 森川容雄：標準計測部長



図7 水素メーザの実験室（提供：情報通信研究機構）

置である一方、周波数の超高安定という特色を生かしてVLBI（Very Long Baseline Interferometry：超長基線電波干渉法）^[8]等各方面で素晴らしい成果を上げている。またメーカーの中でアンリツはCRLタイプの商品化に成功しVLBI等への貢献度が高い。

■ 水素メーザの国際比較 一例

水素メーザが発振に成功した初期の再現性、安定度は前項に述べたとおりである。発振に必要な水素原子とマイクロ波との相互作用時間はテフロンをコーティングした石英ストレージバルブに支配されるところがあり、外国との相互比較を試みた。バルブ以外の構成条件を同じにするため、FEPテフロンをコーティングしたバルブをカナダに手荷物で携行して持ち込み、NRC（National Research Council）のメーザに設定して周波数測定を実行した。その結果出発前のRRLの結果とカナダとは 3×10^{-13} で精度・安定度ともに一致したと佐分利氏は報告した。水素メーザの周波数は主としてバルブによって決まるという特性を利用した世界で初めての比較実験であった。

■ 国鉄ストと磁気遮蔽強化

水素メーザは磁界変化に敏感な特性を持つが、あるとき予想していなかった安定度向上に気が付き、原因を追究したがなかなかつかめなかった。誰かがその日は歴史に残る国鉄ストが予定されていたことを思い出し、1kmも離れた電車電流による微小磁界の影響を確認して、スト終焉後歴史的大事件に依存する貴重な資料を基に、早速、磁気遮蔽の強化を急いだ。その結果安定度を1上げることができた。皆で何が幸いするか分からないものだろうなずきあったものである。

■ 研究開発された歴代原子周波数標準

図8に1950年代から2010年までの歴代原子周波数標準器と確度の一覧を示す。我が国では水素メーザを一次標準として研究されてセシウムと同等の確度が得られていたが、国家標準としては国際的にセシウムで秒の定義が行われているのでこの研究は欠かせない。通信総合研究所(CRL)では6極マグネットを使用した特色のあるCRL Cs1(文献(11)及び図8参照)の研究が行われ、確度 1×10^{-13} を得た(1987(昭和62)年)。この装置はCRLの日本標準時決定に貢献するとともに、国際報時局(BIH)に採用され、国際原子時(TAI)の決定要素として認められた。以後の新しい進展については図8による紹介にとどめる。

国家機関CRLとしては更なる確度向上の要望に応え、確度 2×10^{-14} を達成した(1998年)CRL-O1に次いで、2010年Cs原子泉時計(NICT-CsF1)は 1×10^{-15} 程度を得て更に確度を上げ、電波の周波数一次原器として定着している。

近年、光通信による情報伝送が盛んになり、良質な測定結果を取得したり、規制を実行するについては、光を周波数単位以下まで正確につかむことが必須である。それには現在の秒の定義より確度の高い時計が求められ、NICTは単一カルシウムイオン(Ca^+)光時計、ストロンチウム(Sr)光格子時計の研究の成果⁽¹²⁾が上がり、図に示すような確度が得られ、更なる向上が期待されている。

むすび

現在、原子標準は本稿の最初に掲げ、また図8でも示したように 10^{-16} の桁を測定できるまでに研究が進んでいる。これらの成果は現在第一線で研究している人々の功績による。謹んで敬意を表したい。原子標準だけでも約60年、周波数標準全体の発端からは80年に迫る年月が流れて夜は晴れ晴れと明けて光の領域になった。しかし、最初は必要に迫られて始まった標準開発が原子標準に至るまでには背景となる20年があった。

今年はうるう年にうるう秒が重なったようである。天文観測による秒からの脱却には、うるう秒は避けて通れないことになっているが、このことは別途広報される。

前段では殊更人のつながりに触れたが、周波数標準の研究にはこの人を描いてないという中心的人物の存在があつて、しかもそれが3~4代継続することが望ましい。網島、松本、佐分利はその典型で、現在もその伝統は高いレベルで受け継がれているようである。もちろん周波数標準には多くの研究者が携わり、その一人一人が長い間努力した賜であることは間違いなが、その中心でのまとめが殊更重要度を増すと考えられる。URSIに参加したPTB, NPL, BIHなどは国際会議での存在感を示す上からもこのことを重要視しているようであった。この研究には向上はあるが目的の終了はない。ますますの発展を祈念する。

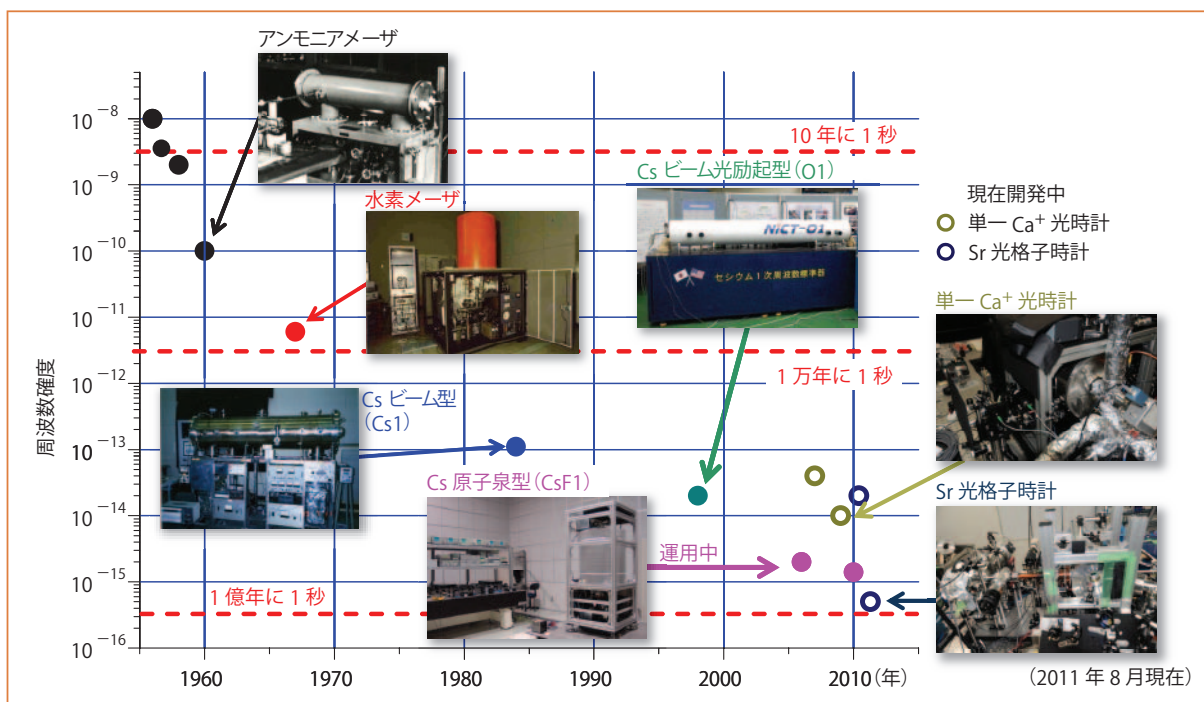


図8 歴代原子周波数標準器と確度の一覧 (提供: 情報通信研究機構) ^{(12), (13)}

謝 辞

本誌への投稿というまたとないチャンスを与えて下さった皆様に感謝致しますとともに貴重な情報を頂いた方々、RRL, CRL, NICTを通して格別の御指導御鞭撻を頂きながら誌面の都合もありお名前の記述もできなかった方々、皆様に誌上ながら合わせて感謝の意を表します。

【用語解説】

[1] **NICT**：独立行政法人 情報通信研究機構の略称である。NICTは2004年（平成16年4月）旧独立行政法人通信総合研究所（CRL）と旧通信・放送機構（TAO）が統合して発足した。CRLは通信省・文部省に始まり、郵政省電波研究所（RRL）、同通信総合研究所（CRL）、総務省通信総合研究所（CRL）を引き継いでいる。TAOは通信放送衛星機構を引き継いでいる。

[2] **CCIR**：国際無線通信諮問委員会ITU（国際電波研通信連合）の技術諮問機関。

[3] **標準電波と周波数標準**：標準電波とは、日本標準時及び標準周波数を電波で配信するものである。周波数標準とは、秒の定義に対応した明示された正確さを持つ周波数であり、標準電波などの周波数の基準として利用される。

[4] **東京天文台の所掌**：国立学校法（1964）第2章第4条参照。

[5] **天文時からの脱却**：1960年のURSI総会（東京）において勧告され、1967年の国際度量衡総会において「秒」の改訂がなされて正式に原子時が採用された。天文観測を基にする前定義からは10年以上の歳月を要して「秒」のふらつきから解放された。

[6] **JJY**：日本標準時及び標準周波数を長波長の電波（東部は40kHz、西部は60kHz）で配信する標準電波のコールサイン。

[7] **ダブルビームメーザ**：図3はシングルビームであるが、空洞共振器へ反対側からも高エネルギー分子ビームを供給するタイプのメーザ。

[8] **VLBI**：Very Long Baseline Interferometry（超長基線電波干渉計）、数十億光年もの彼方から地球に届く電波を、例えば日米間のような離れた距離で同時受信して電波の到達時刻差を精密に計測すると、双方間の距離が1cm未満の精度で測定できる測定系である。同時受信には水素メーザの優れた安定度の採用が必須である。

文 献

- (1) 吉村和幸, 古賀保喜, 大浦宣徳, 周波数と時間, pp. 1-3, p.80, 電子情報通信学会, 1989.
- (2) 網島毅, “同一周波数による同時放送問題に就て,” 信学誌, no. 103, pp.1325-1340, Oct. 1931.
- (3) 網島毅, 米山正夫, 松本喜十郎, “標準電波発射施設に就て,” 信学誌, no.210, pp.577-585, Sept. 1940.

- (4) 佐分利義和, “原子周波数標準と秒の再定義,” 応用物理, vol. 36, no. 10, pp. 841-844, Oct. 1967.
- (5) 網島毅, 波濤, 電波とともに五十年, p.635, 電気通信振興会, Feb. 1992.
- (6) 「時」研究会編, 時の科学, コロナ社, 1966.
- (7) Y. Saburi, Y. Yasuda, and K. Harada, “Phase variations in frequency multiplier,” J. Radio Res. Labs., vol. 10, no. 48, p. 137, March 1963.
- (8) 宅間宏, 量子エレクトロニクス 物理工学講座, オーム社, 1968.
- (9) Y. Saburi, M. Kobayashi, Y. Yasuda, and K. Harada, “Characteristics of the 3-2 line double-beam maser of $N^{14}H_3$ and the precision of frequency comparison,” IRE on instrumentation, Dec. 1962.
- (10) 原田喜久男, “最近の原子標準,” エレクトロニクス, vol. 12, no. 5, pp. 567-574, May 1967.
- (11) 中桐紘治, “六極磁石型セシウムビーム周波数標準器の確度向上に関する研究,” 早稲田大学工学博士論文, Dec. 1989.
- (12) NICT NEWS, no. 409, Oct. 2011, <http://www.nict.go.jp/>
- (13) “光周波数の研究開発,” 時空標準特集, 情報通信研究機構季報, vol. 56, pp. 109-171, Sept./Dec., 2010.
- (14) M. Yamamoto, K. Harada, and Y. Saburi, “A time comparison experiment performed by SSRA System via ATS-1,” J. Radio Res. Labs., vol. 23, no. 110, pp. 85-103, March 1976.

参考資料

- 1) 郵政省電波研究所, 電波研究所沿革史, March 1961.
- 2) 郵政省電波研究所, 電波研究所二十年史, March 1975.
- 3) 総務省通信総合研究所, 電波研・通信総研の思い出集, March 2001.
- 4) CRL 標準測定部, 標準電波開局50周年記念講演集, Jan. 31, 1991.
- 5) 標準測定部中桐紘治原子標準研究室長編, 標準電波五十年の歩み, 1995.



原田喜久男

昭23 通信省中央無線電信講習所技術専攻科（現電通大）卒。同年、同省電波局入局。昭24 水晶振動子開発に参加。昭27 組織替えて郵政省電波研究所標準課において標準電波発生に携わる。昭37 原子標準開発に参加。昭39 マイクロ波研修のため東大に国内留学。昭40 アンモニア標準、水素メーザの開発研究に復帰。昭46 鹿島支所第一宇宙通信研究室長に転進、米国のATS-1号衛星を使用して日米間で原子時計の時刻同期実験を実施⁽¹⁴⁾。昭56 電波研究所退職。（財）移動無線センター理事（平4退職）。