

## 退官記念講演

UDC 621.3.029.6:621.375.826  
523.1:001.892マイクロ波、レーザの研究と宇宙開発  
への道程(みちのり)

Researches on Microwaves, Lasers and Space Developments

斎藤 成文\*

Shigebumi SAITO

## 1. 緒 言

私は昭和16年12月に卒業、ただちに当時設立準備中であつた東大第二工学部の教官予定者として、工学部講師を委嘱された。しかし数日本郷に勤務しただけで1月20日には短期現役海軍技術士官として軍務に服し、海軍技術研究所においてセンチ波レーダの開発研究に従事した後、昭和20年8月終戦と同時に千葉の第二工学部に帰ってきた。以来第二工学部から生産技術研究所と名前は変わったものの、同じ先輩、同僚、後輩に囲まれて現在まで38年の長きにわたり当所にお世話になってきた。その間及ばずながら、私なりに研究、教育の面でその毎日を全力を尽くして努力してきたつもりではあるが、定年退官に際してそのまとめをするに当たり、実りの小さいことに内心忸怩たるものがある。その中でも多少なりと成果が挙げたものがあるとすれば、ご指導をいただいた先輩諸先生を始め、共に同じ途を歩んで私を助けてくださった同僚および後進の方々のおかげである。

30数年の私の研究歴をふり返ってみると、多少の横道はあるものの、大学を卒業してすぐ、海軍で手がけたマイクロ波の研究、それに続くレーザ光の研究、さらにそれらの応用である観測ロケット、科学衛星で代表される宇宙開発、特に宇宙通信等宇宙エレクトロニクスの研究がその主なるものである。これらはいずれも人類の科学技術史にも残るであろうエレクトロニクス分野の勃興期に際し、その主役の一つを占めたものであり、これらの新技術の先駆的研究を行うことができたこと、また特に大学としては破格の大きな特別事業である科学衛星計画の主要メンバーの一人として我が国の宇宙開発に多少なりとも寄与し得たことは研究者冥利につきるものとして関係者の方々に深く感謝申し上げる次第である。

巻末に研究項目の一覧と年代を示した。以下その主なるものについて大要を述べる。

## 2. 高周波誘電加熱の研究

戦争直後に木材、農漁産物等数多くの電氣的絶縁物の

\* 東京大学名誉教授

高周波損による自己発熱を利用した高周波誘電加熱が一つの流行となった。私は学部卒業研究として西先生の理研の研究室で高周波損失の研究をする予定(実際は学年短縮により日電(株)玉川工場で電気音響の研究を行った)であり、かねてこの方面に興味を持っていたので、大学の研究にふさわしい高周波誘電加熱の基礎的研究を行った。

種々の加熱電極、特にグリッド電極の電界分布、インピーダンス特性の解析、実測と加熱条件に対する最適電極配置の決定法、その熱効率と総合特性の予測法を初め、実用上問題になっていた高周波放電現象の解明とその軽減法などの研究を行った。これらの成果は高周波加熱の現場の方々にも大いに参考にしていただき、昭和24年にはコロナ社から単行本<sup>1)</sup>として発刊され好評を博すると共に、昭和26年8月「高周波誘電加熱に関する基礎的研究」により、工学博士の学位を授与された。

複合誘電体上のグリッド電極の研究は後にマイクロ波進行波管回路の研究に大いに役立ち、高周波放電の研究はレーダ・トランスポンダや人工衛星搭載高電圧機器の宇宙空間における放電による事故の解明に利用することができた。

高周波誘電加熱の実利用の一つとして私の慶応幼稚舎時代からの友人の会社である新田ベニヤ(株)と共同研究として特殊成型合板の加工実験を行った。これは同社の東京工場の大きな生産品となるまでに発展し、工学の生産技術までの適用を強く望まれていた瀬藤先生をご案内し、大変お誉めにあずかったことを覚えている。今もって家庭で使用している電子レンジを見るたびに当時研究室で数多くのサンプルを誘電加熱加工していた頃のことか思い出される。

## 3. マイクロ波通信の先駆的研究

先に述べたように戦時中は海軍技術研究所において、センチ波レーダ、特にマグネトロンを用いた超再生検波、オードサインならびに鉱石検波ヘテロサイン受信機、それに導波管伝送路の開発を行った。この間マイクロ波基礎技術の不足を身にしみて感じて終戦を迎えた。戦後し

ばらくの間はマイクロ波研究を始めるような環境にはなかったが、将来のマイクロ波通信には精密測定技術の確立が極めて重要であると考え、昭和22年に学振「低損失誘電体特性測定委員会」が再開されるに当たり、その一員に加えさせていただいた。そして神田のジャンク屋で米軍放出のクライストロンなどを購入してはマイクロ波帯の誘電体特定測定の研究を行った。

昭和23年8月通信省電気通信研究所(後の電電公社通研)が発足し、24年4月に外部委託研究制度を始める際に、3件中の1件として私の研究も採り上げられ、ここに4000 MC 帯誘電体特性測定に関する本格的研究が開始された。これは円筒型  $H_{01}$  空洞共振器の一部に円盤状の試料を挿入し、共振軸長と  $Q$  の変化から誘電体特性  $\epsilon$ ,  $\tan \delta$  を測定するもので、原理は極めて簡単であるが、試料挿入前後の共振器内の電磁界分布の変化による空洞金属壁損失、励振および検出プローブの結合損失の差異をも厳密に考慮した精密な解析を行ってこれらによる測定誤差を除去することに成功すると共に、以下述べる当時としては(現在においても私は自負しているが)世界的に見ても最も精度の高い  $Q$  測定法を開発した。 $Q$  値は共振曲線の半値幅の測定によって求められるが、周波数校正用の高  $Q$  共振器の共振出力を微分することにより、共振点近傍の極めて急峻な出力変化を2現象ブラウン管の一つに入れ、この細い垂直スケールの移動により、他の被測定共振曲線の半値幅を測定する新しい方法を確立した。この研究の成果は通信研究所でも標準測定法として採用され、昭和25年には通研と私の研究室に1組ずつ本格的な我が国最初のマイクロ波測定装置<sup>2)</sup>として試作された。これが今日マイクロ波測定器の専門メーカーである島田理化(株)の第1号製品である。本研究に対して昭和27度の電気通信学会論文賞および服部報公賞を受けると共に、後に私がMITに留学した際、誘電体測定の世界的権威 Von Hippel 教授から激賞された。

さて本測定装置は誘電体特性測定のみならず、その高  $Q$  測定精度を利用して、共振器、導波管や同軸ケーブルの損失を正確に測定することができる。これらはマイクロ波通信機器の基本となるもので、本測定装置を用いてマイクロ波回路の金属表面加工、表面処理法の研究へと進んだ。特に金属板単体のマイクロ波損失を測定することに成功して以来、この研究は急速に進展し、加工精度、銀メッキ、樹脂表面処理など、表面の粗さ、表面状況の差とマイクロ波損失の関係を光学ならびに電子顕微鏡写真と対比しながら研究を進めた。

これらの成果はマイクロ波通信回路開発の初期に当たり、電電公社を初めメーカーの方々のお役に立つことができた。

次の電電公社からの委託研究が「定在波法によるインピーダンス測定の研究」である。導波管定在波測定器は

マイクロ波導波管インピーダンス測定の基本的標準測定装置である。この測定器に関する電磁回路的な詳細な理論解析を行い、その電氣的、機械的設計にもとづいて当時我が国において第1級の機械加工技術を有していた電電公社通研の試作工場において標準定在波測定装置を試作した。その機械精度は導波管内面寸法  $58 \text{ mm} \times 29.05 \text{ mm}$  で  $3 \sim 4 \mu \text{ m}$ ; 残留定在波比 1.001 以下という世界的に見ても最高級のものであった。

この標準定在波測定器を用いて標準無反射終端や可変減衰器の開発研究を行うと共に、導波管継手の寸法誤差や段違いによる反射特性の実測を行い、理論計算の精度の検討を行うなど、いわゆるマイクロ波標準インピーダンス測定技術確立に努力した。この成果は我が国の導波管規格制定の資料にも利用され、さらに IEC の WG 資料ともなった。なお本研究は当時特別大学院学生として私の研究室に入ってきた黒川兼行君が主として担当され彼の博士論文となった。

以上の電電公社の公衆マイクロ波通信用の 4,000 MHz 帯で行われたものであるが、誘電体測定装置としてはその後、レーダに使用されていた 9,000 MHz, 24,000 MHz と高い周波数帯へと進み、物質の誘電体周波数特性の研究へと進んだ。また測定が最も困難である気体、特に含湿空気の誘電率測定については、9,000 MHz で温度係数の極めて小さいスーパー・インバー製の全く同型の空洞共振器を二つ、一体構造で作製し、一方を真空にし、一方に被試料気体を流入させ、その共振周波数差を水晶発振器で校正された低周波発振器で測定を行う装置<sup>3)</sup>を開発した。湿度をパラメータとした含湿空気の誘電率値は数名の各国の測定値と共に参照され、世界標準数値として採用されている。今までに私の行ったマイクロ波精密測定としては後のちまで残るものと喜んでいる。

一方昭和26年には通研で4 GHz PPM 23 通話路方式の実用化が進められ、昭和27年になると東京-横須賀間の実用回線を初め、国鉄の青森-函館間、東北電力の仙台-奥只見間のマイクロ波中継システムが次々と実施された。特に電源開発、東京電力(株)などの電力会社では東北電力の先例に刺激され、その専用通信としてマイクロ波通信への期待がかけられた。電電公社の公衆通信に比し、建設や保守を簡易化するため中継間隔をできるだけ大きくとりたいという要望が切であった。昭和28年から30年にかけて、両電力会社の要請を受け、東京-箱根双子山間(電源開発)、東京-赤城山間(東京電力)のロングスパンの2 GHz, 6 GHz 帯伝ばん実験の共同研究を行った。通信機材等は日電、日無の2社が担当され、また電波管理上の技術的見地から電波監理局の技術陣も一部参加され、我々としてもデータ整理を通じて大きな勉強となった。

#### 4. 電力線搬送に関する研究

この研究は私の本来からの研究からいうと若干の横道ではあるが、電力事業という大きな企業体の技術陣と一体となってエレクトロニクスという新分野より、その問題点の解決に努力した点で大変有意義であった。

さきに述べた電力事業用マイクロ波通信の伝ばん実験への参加も、また後に述べるレーザ CT, PT 等のレーザ計測やレーザ光通信の研究もこの電力線搬送の研究以来の電力会社や電力中央研究所との長い協同研究から生まれたものである。

昭和26年電力線搬送実用の勃興期に当たり、高価な結合コンデンサの代わりに短い並行線條を用いたアンテナ結合により簡易な電力線搬送通信ができないかという問題を東京電力(株)の通信課から持ち込まれた。簡単な計算の上、沼倉発電所構内で昭和26年12月初めの現場実験を行い、予期以上の成果を挙げた。たまたま不発爆弾の処理で休電中であった超高圧西東京幹線を利用して電力3相2回線と2地線の8線條を電力線搬送電流がどのように分配されて流れているかを、新しく試作した位相測定装置を用いて位相を含めたベクトル量として実測することに成功した。当時電力技術界の大御所であった故藤高教授が思わずうなされる程の見事な成果を挙げることができた。

しかし超高圧送電線はなにぶんにも大地上に8本の金属線條があり、対地帰路を考えると16本で、しかも導体回路と対地回路の位相、減衰定数が著しく異なるという大変複雑な多線條伝送回路である。とても時間に制約のある現場実験で詳細な実験を行うことは不可能であったので千葉の東大生研の敷地内に延長2 kmに及び1/10縮尺の金井西東京幹線の模型送電線を建設することにした。東京電力(株)、電気試験所、電力中研などの協力を得たこの模型送電線の実測結果は多線條回路理論の解析と相まってアンテナ結合に関してのみならず、電力線搬送の伝送特性の研究<sup>5)</sup>に大きな進歩をもたらすことができた。

時あたかも超高圧送電線の建設が各地において行われたが、これから発生するコロナ雑音のために各地でラジオ障害が生じるという社会問題をひきおこした。電力線搬送の研究の実績が買われて私もその研究班の一員となったが、電力屋さんが問題にしているコロナ発生源の問題と、その発生雑音電流の送電線上の伝ばんの問題を分離して考える必要のあること、かくすることによりコロナ発生の軽減法と、雑音伝ばんの阻止の手段を独立して考え得ることを力説した。この提案は皆の受け入れるところとなり、全研究班を2班に分け、我々はコロナ雑音源を模擬した小型正弦波搬送発振器を送電線上に吊り下げ、送電線上、ならびに空間伝ばん特性の実測を行った。この特性解明に当たっては上記の模型送電線の成果も大変

参考になったことはもちろんである。また送電線から配電線への結合阻止のためにアンテナ結合の逆の方向の手段が有効となったのも業と毒の関係として興味のあるものであった。

伝ばん特性を測定するのに、原因不明の雑音を用いることなく、等価正弦信号波を用い、その位相関係まで正確に測定するというこの手段は極めて有効であった。この経験は後に MIT の RLE (エレクトロニクス研究所) で行った電子ビーム雑音パラメータ測定のための Selective Beam Coupler の較正にも、また He-Ne レーザの電流変調雑音の研究にも有効に利用された。またこの基本思想は後に述べる電流雑音軽減係数測定のアイディアにも活用されている。

#### 5. マイクロ波低雑音受信と大型パラボラ・アンテナの研究

昭和30年9月より2カ年間マサチューセッツ工科大学エレクトロニクス研究所(MIT, RLE)にフルブライト客員研究員として留学した。この研究所は戦時中に、Radiation Laboratory としてマイクロ波レーダを開発したマイクロ波開発研究のメッカとも言われた所で、戦後名前の示すとおりエレクトロニクスの基礎研究を行う電気工学と物理学との学際研究所に衣替えをしたものである。しかしその施設、設備や職員の陣容の大部分は昔のままで、マイクロ波研究にはまことにまことこの所であった。当時この研究所の大きな研究題目の一つにマイクロ波低雑音受信の研究がとり上げられていた。私はまずこのグループの中に飛びこみ、その基礎研究「電子ビーム雑音パラメータ測定」を行うことにした。

マイクロ波低雑音電子管(クライストロン、進行波増幅管など)の最小雑音指数  $NF_{\min}$  は二つの電子ビーム雑音パラメータ  $S$ ,  $\Pi$  により  $NF_{\min} = 2\Pi / kT_0(S - \Pi)$  で与えられることを MIT の Prof. Haus が理論的に導いた。ここに  $T_0$  は標準線体温度、 $S$  は熱陰極からの熱電子放射ショット雑音によって代表される電流雑音分と初速度分布(Maxwell 分布)による速度雑音分(Rack雑音と呼ばれる)の積、すなわち皮相雑音電力であり、 $\Pi$  は両雑音成分の相関成分を表し、 $\Pi/S$  が相関係数である。

Prof. Haus の式は雑音の一般理論から導かれたもので、 $S$ ,  $\Pi$  のパラメータがどのような値であるかについては別の論議または実測によらざるを得ない。当時は簡単な直線理論から  $\Pi$  の存在すら否定する人達が多かった。私が留学した当時、既に数年に亘り大学院学生を総動員してその実測が行われていたが、 $S$  パラメータはともかく、 $\Pi$  の測定については何ら成果が得られておらなかった。

私はここで電子ビームを通常のマイクロ波回路と同様に取り扱う電子ビーム電磁回路論<sup>6)</sup>を展開し、マイクロ

波回路の Directional Coupler (方向性結合器) に相当する Selective Beam Coupler (選択性ビーム結合器) と新しく命名した結合器を考案, 電子ビーム中の fast wave 成分と slow wave 成分を分離して測定できることを見出した. 電子ビーム雑音の fast wave, slow wave を測定することにより, きわめて簡単な式より  $\Pi/S$  が算出される新測定法を研究室で発表し, 教授連をはじめ研究者一同の拍手喝采を博したのが留学1カ月目のことであった. それ以来英語もろくに喋れない東洋からの留学生 (当時の日本の地位はこんなものであった) は研究グループの主演の一人となり, 楽しい研究生活を送ることができた.

しかしこの測定系を実現するには並々ならぬ苦労があった. 高真空のデマントブル装置の中に測定回路校正用空洞共振器 (前節で述べた正弦波信号励振用) 付きの低雑音電子ビーム発生部および Selective Beam Coupler を構成する雑音検出用の2個の可動空洞共振器を設け, これにビーム安定用磁界を印加しつつ, Selective Coupler を数十 cm 真空シールを通じてモータ駆動によって移動させながらの雑音測定である. 各部分の機械設計の図面作製, 試作工場への依頼に始まって完成部品の洗浄, 真空処理, 組み立てを経て, 神に祈る気持で真空ポンプを作動し, 高真空になるのを待つという毎日であった. これらは当時米国でも最高の電子管真空技術の支援によって達成されたわけで, それらを身をもって体験したことはその後の私の研究生治に大きなプラスになった.

2カ年の留学生活もぎりぎりあと3カ月という頃にやっと実験装置も満足に稼動し出し, 懸案の電子ビーム雑音パラメータも数多く測定することができ, 特に存在すら疑われた  $\Pi$  も  $\Pi/S$  で  $0.1 \sim 0.3^9)$  になることが見出された. この実験は帰国途中に出席した 1957年9月の URSI 総会でも発表し, この方面の第一人者のベル研究所 Pierce 博士から elegant な方法であるとの評を受けた. また電子通信学会からも昭和33年度の論文賞を頂いた.

帰国後この研究を続行するに当たり, 当時の我が国の真空技術レベルをも考慮してデマントブル真空装置の使用をさせ, 封じ切り低雑音電子ビーム被測定管を試作, その外部にマイクロ波測定回路を設け, さらに後に述べる研究室で開発中であったパラメトリック増幅器を低雑音受信器として使用するなど MIT の装置より数段の改良を加えた. この研究は当時新制大学院学生として入学した藤井陽一君が担当したが, その成果は MIT で私のあとに続行された研究よりも数段前進し, 極めて興味のある実測結果<sup>9)</sup>を昭和36年 NY 州 Troy で行われた Tube Conference に発表し好評を博した.

雑音パラメータの内,  $\Pi/S$  の測定が進むにつれ, 問題は  $S$  の絶対値に移ってきた. Rack 雑音と呼ばれる速度雑音成分は Maxwell 分布の特長で, 陰極直前の電位最

低点の影響を受けることがなく余り問題はなかったが, ショット電流雑音がこの電位最低点の影響でどの程度軽減されるか, その軽減係数が大きな問題であった. 低周波帯では理論計算も行われ, 実測値もあるが, マイクロ波帯では位相遅れが複雑に入り近似計算すらその仮定により大きな差異を示す. 当時ベル研の Tien 博士が電子計算機で行った Monte Carlo シミュレーションの結果が一般には認められていた. また実測は全く不可能と考えられていた.

後に述べるように昭和36年末米国からルビー・レーザを我が国で初めて輸入し, レーザ光変復調の実験を開始したが, このレーザ光を熱陰極に照射して得られる光電子のマイクロ波検波成分 (ルビー・レーザ光の縦ビートに相当するもの) を追跡実測することにより, 軽減係数を算出することができるという全く新しい方法を考案した. レーザ照射可能な特殊電子管を試作し, 昭和38年に藤井君によって初めて実測されたが, 精度や誤差の検討に問題が多く, レーザ光技術の進歩に待たねばならなかった. その後ルビー・レーザにモードロックを加えてマイクロ波成分を増大したり, その安定化等の改良を加え8年後の昭和46年に至り, 岩本明人君により信頼のおける実測値を得ることができるようになった. その実測値が上述の Tien 博士のシミュレーション計算値と余り異なるのに疑問をいただき, 彼の計算法を新しい大型電子計算機で追試し, 彼がシミュレーションに用いた乱数のとり方や途中の省略法によって, いわゆる Tien's Dip といわれた最小点が生じるものであり, 軽減係数値は実測値に近い平坦な周波数に対して右上がりの曲線になることを結論<sup>9)</sup>とすることができた. 軽減係数の実測は世界で私の所だけであり, ここにマイクロ波縦型電子ビームの電流雑音・軽減係数に関しては最終結論とすることができ<sup>10)</sup>たと考えている.

なお以上の電子ビーム雑音の基礎的研究と並行して, その成果を採り入れつつ MIT では中空電子ビームを用いた UHF 帯低雑音進行波管の試作を, また帰国後はその経験を活かして日本電気(株)との共同研究として4~6 GHz 帯の低雑音進行波管の試作研究を行った. 低雑音電子管の製作は理論面と同時に, 電極部品の材質選定, その洗浄, 真空処理, 排気手順など製造技術的な問題が重要である. 基礎研究の成果により電極配置などの設計を行うと共に MIT 留学中に自ら電子管製作に当たった経験に基づいて製造実験を行い, 当時としては雑音指数の極めてよい低雑音増幅管の製作に成功. 実用にも供された.

次にパラメトリック増幅器の開発研究の話に移ろう. 私の帰国間近い頃からメーザやパラメトリック増幅器(以下 PA と略す)が低雑音増幅器として注目され出した. 帰国後もベル研究所の植之原氏などの努力により PA の

低雑化の報告が次々と発表された。私はその重要性を認識し、自らその開発研究を行うと共に、昭和34年8月に電気学会にパラメトリック増幅器専門委員会を設置し、委員長として研究機関、メーカーの専門家を集めて我が国全体としての開発研究の促進に努めた。この委員会は約5年間続き、その集大成として昭和42年にパラメトリック増幅器便覧(電気学会編、オーム社)を刊行することができた。

これより先、帰国直後より東京大学観測ロケット特別事業に参加していたが、宇宙開発における低雑音受信装置の有用性を考え、浜崎襄二助教授の協力を得てまずロケット追跡レーダ用のPAを試作し、早くも昭和35年9月秋田実験所で実用に供し、大きな成果を挙げることができた。その後昭和37年に新設された追跡レーダを初め、すべてのレーダにはこの低雑音受信装置が活躍している。一方さきに述べたとおり、電子ビーム・パラメータ測定用として私の研究室で低雑音PAが早くから実用になっていた。

これと並行して宇宙通信用冷却型PAについてはその広帯域化の回路理論的、実験的研究が黒川助教授や当時国際電電(株)KDDから研究室に派遣されてきた野坂邦史氏によって進められた。現在我が国の低雑音PAは世界第1のレベルにあり、世界中の宇宙通信地球局の半数以上を占める我が国メーカー製のPAは上述の委員会のメンバーであった人々によって達成されたものである。

さらに進行波型PA、特に縦型電子ビームPAの理論解析を行うと共に、横型電子ビームPAについては直流励起型を含めた各種のサイクロトロン波PAの理論ならびに試作管による実験的研究を進めた。この間共同研究者である日電(株)の見目正道氏と共に2回に亘り電子通信学会論文賞を受けた。これらはいずれも実用には至らなかったが、その後レーザ光PAの研究に対して大いに活用することができた。

高性能な大型パラボラアンテナは低雑音増幅器と共に低雑音受信、特に宇宙開発用には不可欠のものである。雑音温度の低いアンテナを用いることにより、初めて低雑音受信装置の威力が発揮できるわけで、両者の研究は車の両輪の関係にある。この意味において低雑音大型パラボラの基礎研究を早くから始めていたが、昭和36年鹿児島県内之浦に東京大学鹿児島宇宙空間観測所(以下KSCと略す)の設置が決定され、同時に観測ロケット、科学衛星テレメータ受信を主目的とした宇宙通信用大型パラボラアンテナの建設が決まって以来、本格的な開発研究が開始された。

当時我が国としては全く未経験であった大型パラボラアンテナの建設には土木・建設・機械・自動制御ならびにマイクロ波アンテナ技術の各分野の協力が必要であった。鏡面積度の高い20mにも及ぶ大型パラボラアンテ

ナを空間の任意方向に自動追尾し、しかもその測角精度 $0.01^\circ$ 以下という要求を満たすために建築構造、特にシェル構造のご専門の坪井先生、基礎工程には土木の丸安先生などのご指導をいただきつつ、建設を担当した電気メーカーの技術者と共に広範囲の勉強を行った。昭和36年の渡米に際し、NASAの研究センターを見学して、当時としては殆ど先例のなかったカセグレイン給電方式の将来性を認識した。内之浦のアンテナのみならず当時、時を同じくして同一メーカーで建設が予定されていた国際電電(株)KDDの茨城宇宙通信実験所のアンテナにもカセグレイン方式を採用すべきであるとの提案を行った。当時私はKDDの宇宙通信委員会の委員としてKDDとも協力を行っていたので、両者のアンテナともカセグレイン方式を採用することになった。その後長くKDDとの協同研究は続いた。

今日の宇宙通信用アンテナの殆どすべてはこの方式をとっており、しかも世界の宇宙通信地上局の過半数が世界一の技術力を誇る我が国メーカーの製品であることを想う時、その予見の誤りでなかったことを今でも誇りにしていると共に、その進歩には感無量である。

## 6. レーザ光に関する研究開発

昭和36年、留学から帰国して4年ぶりに渡米して、マイクロ波研究者の多くが一つには核融合などのプラズマ物理の方面に、一つにはその前年の昭和35年Hughes社のMaiman博士によって発明されたレーザの分野に大きく転身していることを知った。レーザ光はその空間的コヒーレンシのよい、光学関係者にとって夢の光である。また我々マイクロ波研究者にとっては周波数スペクトラムをさらに1万倍も上げたことに相当し、いわば仕事の場が1万倍も増大したことになる。私はここに歴史の古い光学、Opticsと新興間もないElectronicsの合体を意味するものだと思った。最近Opto-electronicsと謂<sup>11)12)</sup>われているものはここに源を発している。

たまたまMIT留学中の友人がRaytheon社でルビー・レーザ発振器を製造していたので、頼みこんで至急日本に輸出するよう手配した。このレーザ装置はその年の末には入手でき、我が国の電子通信関係者としては最も早く、その発明の翌年から「レーザ光のエレクトロニクス分野への応用」を標榜して、以下述べるようにレーザ光に関する幅広い研究開発を行ってきた。その研究方針は光高周波技術の開拓というマイクロ波研究の延長線上を歩むことであった。これがまたマイクロ波通信からレーザ光通信への先駆的研究<sup>13),14)</sup>につながるものであった。

この間昭和37年より3カ年間および昭和42年より3年間、電電公社通研より特別大型委託研究を、また昭和39年には「レーザ電磁回路素子の開発研究」に対して東洋

レーヨン科学技術研究助成金を受けた。また昭和52年度より3カ年間に亘り「光導波エレクトロニクス」特定研究委員会の第V班光回路素子の主査として光集積回路素子開発のまとめ役を務めている。

まずレーザ光の検波、変調ならびにレーザ光電磁回路素子など基本的レーザ光技術の開発について述べよう。レーザ光に含まれるマイクロ波帯にいたる高周波成分を検出することは光通信などレーザ光のエレクトロニクス分野への応用での重要課題で、周波数帯域の広い高速応答特性をもつ各種光検波器の開発を行った。ルビー・レーザ装置を最初に輸入した昭和36年当時、我々の研究室ではパラメトリック増幅器の研究を行っていたのは前述のとおりである。これに用いるパラメトリック・半導体ダイオードがたまたまガラス容器に収められていたので、これにレーザ光を照射すると共に、これによって検出されるマイクロ波成分を同じダイオードによってパラメトリック増幅を行わせるという新しい検波方式を開発した。この光検波パラメトリック増幅器は検波感度が極めて高い(低雑音PAなので雑音出力も少ない)ことと、アイデアが斬新であったために米国の Electronics 誌<sup>15)</sup>にも大きく写真入りで採り上げられ、また昭和38年5月のBrooklyn工科大学のシンポジウムの招待講演を依頼されるまでに発展した。

電子ビームのショット雑音軽減係数測定のために熱陰極にレーザ光を照射する方法を開発したことは前節で述べたが、この現象を積極的に利用し、光電陰極と低雑音進行波管を1本の電子管にまとめた光検波進行波増幅管を考案した。これは後に日本電気(株)より市販されるまでになった。その後光電流をてい倍する横型光電増倍管とその検波出力を増幅する横型進行波管を組み合わせた横型光電子増倍進行波管(ピオン・ピョントロン)を考案、試作した。これは残念ながら一部設計の不具合から総合特性を得るまでには至らなかったが部分的には興味ある結果が得られた。

10 $\mu$ m帯のCO<sub>2</sub>レーザ光用として当時大学院学生だった小関健君がTGSを用いた焦電型光検波器の開発を行った。これは常温作動で高速応答特性があり、将来性を注目されているものである。さらに検出された超音波を同時に超音波3周波パラメトリック増幅する新しい焦電型光検出超音波パラメトリック増幅器の開発研究<sup>16)</sup>へと進んだ。我々の研究室の人々がレーザ検波とマイクロ波PAの研究を複合して開発を進めたことは興味あることである。

レーザ光の変調としては昭和37～42年の木村達也君の進行波型光位相変調器の研究がある。変調用マイクロ波回路とレーザ光の位相速度との整合をとるため、多数のプリズムを用いてレーザ光をジグザグに折り返す新しい方式を考案した。当時としては世界的レベルの6GHz

に至る広帯域特性を得ることができ、その見事なレーザ光ジグザグ模様を研究所にお出でになった皇太子殿下が大変興味深くご覧になった。なお、レーザ光変調の研究が後に述べるレーザPTの開発へと進んでいった。

He-Neレーザ光に含まれる雑音の一つに放電々流に起因するものがある。その変調雑音の機構を解明する目的で、放電々流に可変周波変調電流を重畳し、これとレーザ光変調成分とのベクトル関係を測定し、電流変調雑音の伝ぱん特性<sup>17)</sup>を明らかにしたが、この実験方法はさきに述べた我々の研究室の雑音研究方針の一環をなすものである。

マイクロ波回路素子がマイクロ波通信に不可欠であるのと同様にレーザ光通信や高級なレーザ応用にはレーザ光回路素子の開発が極めて重要である。またその開発のためにも精密測定技術を確立することが急務である。昭和36年レーザ光研究の当初よりこれらの問題は我々の研究室の主要研究題目として採り上げてきた。可視帯レーザ光用の精密可変減衰器として3個の偏光プリズムを用い、偏波面を保存しつつ回転角の正弦に比例した減衰量をもつ装置を考案したが、これは減衰量を理論値で求めることができるという特長をもち、現在も広く市販されている。

鉛ガラスと複合偏光プリズムを用いて、ファラデー回転を利用した新しい光アイソレータ、サーキュレータを開発した。特にファラデー回転の波長依存性、温度特性等安定精度の検討、磁界印加方法の改善やCeガラスなど磁界感度の大きい新種ガラスの開発を行ってきた。この研究の途上、後に述べるレーザCTの開発が派生的に生まれたことはまことに幸いであった。

10 $\mu$ m帯のCO<sub>2</sub>レーザ用の減衰器として標準となるものが少なく、この帯域の精密器測定に大きな支障となっていた。大学院学生であった小関健君は2個のGe全反射プリズムの間隙を変化して減衰量を可変にする精度可変減衰器を試作することに成功した。微細な間隙はPZTに印加する電圧により精密調整ができ、その値は電気的容量の測定値によって校正する方式をとり0.01dbの精度<sup>18)</sup>を得た。

また光ファイバの低損失化が実現して以来、光ファイバをレーザ光伝送回路として用いることが一般化してきたが、各光ファイバ回路素子についても開発が進められ、昭和47～49年には平行結合型および半透明鏡型方向性結合器を考案、試作を行っている。さらに近年第2世代のレーザ光素子として大きな注目を浴びている光集積回路については昭和49年以来、グレーティング周期構造をもつDFB(Diffractiun Feed Back)光導波回路の研究を行っている。ガラス基板上にDFBグレーティング光導波路を作製し、斜め入射の場合にTM・TE波モード変換が生じることを見だし、この現象の解明と、その周波数特

性を利用した新しい分波フィルターへの応用研究などを行っており、将来の複雑な光 IC 回路への利用が期待されている。またこの光導波回路に種々のビーム・パラメータを持つガラス・ビーム光を入射し、その透過特性の変化を測定している。これは時間周波数に対する回路レスポンスという従来の電気回路特性に対して、空間周波数に対するレスポンスという新しい回路特性を示すもので、現在理論的、実験的研究が進められているが、レーザ光電磁回路の新しい研究題目として私なりにその将来の発展を期待しているものである。

これらレーザ光電磁回路素子の研究には回路アナライザ装置が必要となってくる。波長同調可能な色素レーザを光源とし、これに光の偏波面、位相ならびにガウスビーム・パラメータを可変にする掃引装置を付加したもので、任意の偏波面、位相をもつレーザ光の時間ならびに空間周波数掃引が可能なアナライザを実現しようとするものである。そのビーム・パラメータも断面上2方向に定められた位置に可変なビーム幅のビーム・ウエストをもつよう設計されており、現在実用装置としてのまとめを行っている。

次にレーザ CT, PT の開発研究の話に移ろう。超高压送電線の電流、電圧を電気導体回路を用いることなく、レーザ光を利用して遠隔無接触測定する新しいレーザ CT, レーザ PT 装置について長年にわたり開発研究<sup>19)</sup>を行ってきた。さきに述べたとおり、光サーキュレータを開発中であった昭和41年、東京電力(株)大野氏より無接触 CTの研究依頼を受け、磁界印加に苦労していた光サーキュレータそのものの逆利用を思い立ったのがこの研究の端緒である。レーザ PT は光変調器の延長線上の研究である。この研究の詳細は東大生研報告に譲るが<sup>20)</sup>、基礎的研究を研究室内でを行い、東京電力(株)、電力技術研究所の協力を得て現場実験を実施した。その後欧米各国で次々と我々の実験を参照した論文発表があり、各社からの製品紹介も行われている。昭和50年には本発明に関する大野・藤井との共同3特許に対して発明協会から恩賜発明賞を、また電気学会から論文賞を受けた。最近の半導体レーザの進歩と共に鉛ガラス・ファイバの開発により近い将来の幅広い実用装置の出現を期待している。なおレーザ CTと並行して、レーザ光の代わりにマイクロ波を電源とし、フェライトを磁気センサーとするマイクロ波 CTの開発研究を三菱電機(株)の協力を得て進めてきた。

レーザ光の測量への応用研究としてはレーザ・トランシットおよび精密測距装置の開発がある。土木の丸安教授を通じて大成建設よりトンネル掘削用シールドの位置および掘削方向ずれを計測する装置の開発依頼を受けた。He-Ne レーザを用いた我々の命名になるレーザ・トランシット装置を開発試作し、大成建設の近鉄難波乗入れ

地点の建設現物で実用に供した(昭和48年 特許証第667034号)。

He-Ne レーザ光を136 MHzで変調し、ターゲット反射波と変調波の位相を精密測定することにより測距を行うレーザ測距装置について、新しい較正方法を考案することにより距離45 mにおいて位相差0.03°, 測距精度0.1 mm以内に収め得ることを確かめた。この研究は宇宙通信用 R & RR (直距離および距離変化率) 測定装置の開発研究を兼ねて行われたもので、統計的处理による位相差、測距精度、誤差の解析など詳細な検討が行われた。

レーザ光を用いたリモート・センシング、特に大気汚染計測について、レーザ光の優れたスペクトル・コヒーレンシイを利用した二つの新しい計測方式を開発している。一つは10 $\mu$ m帯の外来インコヒーレント光(熱放射による赤外光)をヘテロダイン検波によって受信する方式である。可変周波数 CO<sub>2</sub> レーザを局部発振とし、入射光の10 $\mu$ m帯の吸収スペクトルを精密測定することにより、NH<sub>3</sub>, SF<sub>6</sub>, CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>などの汚染物質濃度の測定可能なことや、放射スペクトル測定により温度分布と汚染物質濃度の求められることを確かめた。

同調可能な色素レーザ光(ローダミン6G)を窒素酸化物(NO<sub>x</sub>), I<sub>2</sub>, Br<sub>2</sub>などの汚染大気中を通じ、汚染物質に特有な吸収スペクトルから汚染物質の種類と濃度を同時に測定し得る方式を開発した。これは電子計算機による多数データの処理によって初めて可能となったもので、1回のスペクトル掃引による数多くの汚染物質が分離測定可能なことを確かめた。またフーリエ変換によりレーザ波長掃引時のジッタによる誤差を軽減し得る新しいデータ処理方式をも開発した。

レーザ光の宇宙開発への応用として宇宙飛しょう体のレーザ・トラッキングシステムの開発研究を挙げることができる。私共は昭和39年以来レーザ・レーダの基礎研究を行ってきたが、昭和42~43年度に日立製作所が通産省の鉱工業補助金を受けて人工衛星追跡用レーザ・トラックの試作を行う際に技術指導を依頼された。東京天文台関係者の協力を得てその完成に努力し、同堂平観測所において実用に供するまで至った。以後東京天文台の努力により改良が重ねられ、現在は月面レーザ反射鏡からの反射光受信にも成功し、また昭和58年頃に打ち上げが予定されている我が国の測地衛星GS-1にもレーザ・トラッキングシステムが用いられる。

一方人工衛星に搭載するコーナ・キューブ反射プリズムについては昭和42年に完成した東大生研千葉実験所のミリ波・レーザ伝送実験設備100 mトンネルを用いて、基礎実験が進められてきた。昭和51年に至り、試験衛星MS-T4に搭載する目標で東大宇宙研のSA-10研究班の研究として採り上げられた。昭和55年2月に我々の開発した反射プリズムを搭載した衛星の飛しょうが行わ

れた。

レーザ光通信は大気伝ぱんの少ない宇宙通信、特に将来宇宙飛しょう体間の遠距離通信の分野に広く用いられるであろうことは疑いのないところである。最もプリミティブな応用として地上局から宇宙飛しょう体にレーザ・コマンドを送出、その反射光に応答信号を重畳させ、反射波を地上局で受信することにより、双方向通信が単一のレーザ光で可能とするシステムが考えられる。これは MIROS (Modulation Inducing Retrodirective Optical System) と呼ばれるもので、NASAの机上プランであった。私はその将来性とちょうど当時に之浦18m径パラボラアンテナの視準塔間、距離5kmのコマンド通信の必要があったことも考慮して本システムの開発に踏み切った。またその変調方式は当時科学衛星コマンドに採用予定のPNコード変調を採用し、このシステム実験をも兼ねることにした。昭和41年KSCに設置され<sup>21)</sup>、以来今日まで極めて有効に稼動し、実用になっている。また数年に亘り5km折り返しのレーザ光空間伝ぱん実務を実施し、貴重な伝ぱん資料を得ることができた。

なお前述の千葉実験所の100mトンネルはレーザ空間伝送実験のみならずレンズ系伝送回路の研究にも極めて有効に使用されている。

## 7. 宇宙開発に関する開発研究

昭和30年東京大学生産技術研究所において観測ロケット特別事業がスタートした直後、2カ年間MITのエレクトロニクス研究所にて低雑音電子ビーム増幅器の研究を行うために渡米したが、昭和32年帰国以来今日までこの特別事業の主要メンバーとして指導的立場を努めてきた。

この間昭和39年には東京大学宇宙航空研究所が発足し、科学衛星特別事業へと発展した。幾多の苦難の途はあったものの、昭和45年2月我が国初の人工衛星“おおすみ”を打ち上げて以来、6個の科学衛星を含めてすでに11個の衛星の打ち上げに成功し、宇宙科学上多くの貴重な成果を収めることができた。これと並行して昭和44年10月宇宙開発の実用面実施のために設立された宇宙開発事業団の非常勤理事として昭和49年5月まで勤務し、実用衛星計画にも参画した。引き続き昭和49年5月より現在まで宇宙開発委員会委員(非常勤)として我が国の宇宙開発計画全般の作定に参与している。

この間電子通信学会より昭和40年度には業績賞、昭和51年には功績賞を、また昭和46年には電波の日に際して宇宙エレクトロニクスへの寄与に対して郵政大臣賞を受けたが、以下述べる如く宇宙開発関連の開発研究はいずれも特別事業というビッグ・プロジェクトの一環として行ったもので、個人的業績というよりグループ全体の成果である。

まずロケット追跡レーダと電波誘導システムの開発について述べよう。昭和30年観測ロケット特別事業が発足してからロケット追跡レーダには当時黒川助教授が担当していたが、私が昭和32年帰国後はチーフとして担当し、新しい4m追跡レーダ、それに続く精測誘導レーダの計画設計のとりまとめを行い、その開発に努力した。特に精測レーダは当時としては極めて珍しかった実時間処理電子計算機を付属し、その追跡精度も世界最高のものであった。宇宙開発事業団の種ヶ島宇宙センターの誘導レーダも本システムをそのまま採用している。昭和42年に精測レーダがKSCに設置されて以後は従来からレーダ班の主要メンバーであった浜崎教授がその開発、運用を担当するようになった。

科学衛星打ち上げ用M-ロケットの第2世代M-3C型より追跡レーダ・リンクを用いた電波誘導方式を採用することを計画した。このため昭和42年には電波誘導システム研究班を設立し、以来我が国独自の電波誘導システムの開発に努力した。このシステムはロケット追跡およびロケット搭載レーダ・トランスポンダ担当者、ロケット搭載誘導制御機器担当者、ロケット飛しょう計画担当者および電子計算機プログラム担当者の多年に亘る並々ならぬ協力によって達成されたものである。昭和49年2月のM-3C-1号機による試験衛星“たんせい2号”の打ち上げ以来極めて有効に本電波誘導システムは作動し、以後も種々の改良が加えられている。詳細は文献<sup>22)</sup>を参照されたい。

次に観測ロケットおよび科学衛星アンテナの開発研究の話に入ろう。飛しょうに伴う衝撃、振動、空力加熱など機械的、熱的制約を受けることの多い観測ロケット用アンテナの設計はアンテナ技術としても特殊なもので、多くの問題を解決しなければならなかった。その開発は高木先生が黒川助教授などの協力を得て、そのまとめを担当されたが、先生のご退官後は私がその担当を引き継ぎ、主として市川満助手が実験研究に当たってきた。大型のM-ロケット搭載用アンテナには小型観測ロケットにはない数多くの問題点があり、特に電波誘導システムの採用と共にその困難性は増大した。これらの諸問題を龐大な電波暗室などでのモデル実験による改良と時間切換えアンテナ方式の採用により克服した。<sup>23)</sup>市川助手は昭和53年その功績によりオーム技術賞を受賞している。なお実用衛星打ち上げ用N-ロケットの電波誘導レーダ・アンテナの設計、試験もすべてこのグループが指導したものである。

複雑な形状をした科学衛星において数多くの長大な金属センサ・プローブの影響を受けることの少ない、良好なパターンを持つ衛星アンテナを設計することは極めて困難な問題である。昭和39年に東大宇宙研に科学衛星研究班(SA研究班と略称)が設けられて以来、SA-5班は



衛星アンテナの開発を担当し、私とその主査となった。

衛星を単純モデル化し、理論計算によりアンテナの基本系を決定、その詳細形状を電波暗室におけるモデル・シミュレーション実験によって調整する方法をとっている。また飛しょう後の実測結果と予測データを数多く検討し、将来のアンテナ系設計の資としている。

さて科学衛星追跡システムの開発研究に話を進めよう。国土の狭隘な我が国の国内からのトラッキングのみによって果たして正確な衛星軌道が決定し得るかということは科学衛星計画の当初より大きな問題であった。米、ソ連の例にはないこの未知の問題を解決するためにSA研究委員会にSA-10班が設けられ、東京天文台、電波研究所の専門家の協力を得てそのとりまとめを行った。地上追跡局から角度併用ドプラー精密測定を行う方式を採り上げ、大型電子計算機による龐大なシミュレーション計算を行うと共に、超高精度ドプラー周波数測定装置を試作し、米国の人工衛星電波を観測受信して詳細な検討を進めた。当初は宇宙科学観測上の要求から必要とする軌道精度(約10 km)が得られず、悲観すべき状態であったが、度重なる計算アルゴリズムの改良により苦難の途を切り抜けることができた。その成果に基づいて、当時の宇宙開発推進本部(現在は宇宙開発事業団に移管)が勝浦、沖縄の2追跡局と東大内之浦局の3追跡データを総括、軌道計算を実施するという我が国の人工追跡システムを完成することができた。<sup>24)</sup>昭和43年2月のことである。以後各種のハード、およびソフトの改良が加えられ、軌道決定精度も大いに向上している。これらの成果は実用衛星の追跡システムに対しても大いに利用されている。

科学衛星打ち上げシステムとKSC(東京大学鹿児島宇宙空間観測所)地上施設・設備の開発について述べよう。昭和衛星打ち上げ用ロケットであるM-4S型は第3段ロケット燃焼終了まで無誘導で、その後姿勢制御、スピン安定ののち、第4段を衛星軌道に導入する方式をとった。その改良型であるM-3C、M-3H型ロケットは第2段TVC制御に電波誘導を加え、姿勢制御、スピン安定して第3段を軌道導入するものである。これらの打ち上げ方式は観測ロケットから出発した我々の技術的背景と実験場の地理的條件からくる飛しょう安全確保の必要から考案された我が国独自の衛星打ち上げ方式である。このシステムの開発に当たってはロケット担当者、搭載制御機器担当者、地上施設・設備担当者等の綿密な検討の結果生まれたものである。

昭和36年に鹿児島県内之浦町に実験場を建設することが決定されて以来、実験場施設・設備委員長としてすべての地上施設・設備建設のまとめ役としての責を果たしてきた。その施設・設備としてはロケットおよび衛星の発射前整備、調整のための施設・設備、ロケット発射施設・設備、発射司令連絡ならびに飛しょう安全施設・設

備、テレメータ、コマンドならびに追跡および電波誘導レーダ設備、光学追跡設備、衛星軌道導入後の科学衛星トラッキングならびにデータ・アキジション施設・設備など極めて多種多様な施設・設備が必要である。これらの開発については数多くの東大宇宙研報告<sup>25)~27)</sup>ならびに日本航空宇宙学会誌の拙文を参照せられたい。<sup>28)</sup>なお私が宇宙開発事業団の非常勤理事として種ヶ島宇宙センターの指令管制室を中心とする指令管制システムの計画、設計のまとめ役を勤めた折にもこのKSCの建設の経験が大きく役立ったことである。

その他科学衛星計画については昭和40~45年の開発の初期に当たり、当時全く未踏の分野であっただけに宇宙太陽電池の開発、電子部品の放射能テスト、その信頼性の予測を初め、スペース・チェンパの建設等の苦勞が思い出される。<sup>28)~30)</sup>また度重なる実験の不具合の原因解明、特に第2号科学衛星“でんば”の高圧回路放電事故の究明とその対策の確立に多くの関係者の方々と共に努力したことは今になれば楽しい思い出である。

以上主として科学衛星計画について述べてきたが、より広く宇宙開発、特に宇宙通信のための宇宙エレクトロニクスに関するものとしては5、6で述べたマイクロ波低雑音受信と大型パラボラ・アンテナの研究およびレーザ光の宇宙通信への応用に関する開発研究がある。前者については低雑音パラメトリック増幅器と大型アンテナを中心とする宇宙通信地球局はその技術的性能と価格のいずれの面でも我が国の製品は世界一のレベルにあり、世界の地球局の過半数を占めている現状をみるにつけ、感無量である。レーザ光通信の宇宙開発への適用は現在衛星トラッキング装置が実用されているのみである。しかしスペース・シャトルの新しい時代を迎え、その近い将来の大きな応用の進展を切に期待したい。

最後に宇宙開発長期ビジョンの作成について述べよう。昭和50年2月より昭和52年7月の間、宇宙開発委員会に設けられた宇宙開発長期ビジョン特別部会の部会長<sup>31)</sup>として宇宙開発各分野の専門家の協力のもとに、今世紀末までの20数年に亘る我が国宇宙開発の長期ビジョン作成に努力してきた。この答申を受けて宇宙開発委員会は昭和53年3月宇宙開発政大綱を決定したが、その素材は長期ビジョン特別部会の答申にあったことを想う時、今もって大きな責任を感じている。国家的大プロジェクトである宇宙開発の将来計画については今後とも数多くの専門家の協力を得て、より適切なものに見直してゆきたいと考えている。

## 8. 結 論

以上定年退官に当たり、30数余年に亘る東京大学における教育、研究の足跡を述べさせていただいた。改めて多数の諸先生、同僚および後進の方々のご指導、ご協力

ならびにご援助のお陰と深く感謝申し上げる次第である。東大退官後は心を新たに別々の観点から後進の指導と、かねて考えてきた私独自の研究を行いたいと思っている。また宇宙開発委員会委員として今後とも我が国の宇宙開発が健全な発展を遂げるよう及ばずながら努力いたす所存である。

(1980年2月20日受理)

### 参 考 文 献

- 1) 斎藤(代表執筆)「高周波加熱」昭和24年11月コロナ社
- 2) 星合、斎藤「4000 Mc に於ける誘電体特性測定に関する研究」電電公社通研基礎研究部成果報告70号, 昭和26年12月
- 3) S. Saito, "Measurement at 9,000 Mc of the Dielectric Constant of Air Containing Various Quantities of Water Vapor," Proc. IRE, 43, 8, 1009, 1955.8
- 4) 高木、斎藤ほか「電力線搬送のアンテナ結合現場実験と送電線上の通信電圧分布実測結果: 電気学会誌 72, 771, 757 昭和27年12月
- 5) 高木、斎藤ほか「模型送電線による電力線搬送の分布結合に関する理論的ならびに実験的研究」東大生研報告 7, 6, 1958.11
- 6) 斎藤「電子ビーム電磁回路論」昭和35年1月 オーム社
- 7) S. Saito; "New Method of Measuring the Noise Parameters of an Electron Beam"; Trans. IRE, ED-5, 264, 1958
- 8) Y. Fujii; "Studies on Electron Beam Noise"; 東大生研報告, 14, 4, 1965.8
- 9) S. Saito et. al.; "Monte Carlo Calculation and Measurement of Shot Noise Reduction Factor"; IEEE. Trans. Elec. Devices, ED-1911, 1190~98, 1972.11
- 10) 斎藤「電子ビーム雑音の研究」電子通信学会誌, 54, 5, 646, 昭和46.5
- 11) 斎藤「オプトエレクトロニクス特集 総論」電子通信学会誌, 56, 4, 450 昭和48.4
- 12) 斎藤「オプトエレクトロニクスの現状と将来」電子通信学会誌, 57, 2, 134, 昭和49.2
- 13) 斎藤「光通信の歩み」テレビ学会誌, 32, 4, 262, 昭和53.8
- 14) 斎藤「マイクロ波から光へ」電子通信学会誌, 62, 7, 745, 昭和54.7
- 15) S. Saito et. al.; "Versatile Point-Contact Diode," Electronics 1963.1
- 16) T. Ozeki, S. Saito; "Pyroelectric Detector Coupled with an Ultrasonic Parametric Amplifier"; IEEE J. QE, QE-8, 3, 289, 1972.3
- 17) S. Uehara, S. Saito; "Modulation Noise of a 6328 Å He-Ne Laser"; Proc. IEEE, 58, 4, 598, 1970.4
- 18) T. Ozeki, S. Saito; "A Precision Variable Double Prism Attenuator for CO<sub>2</sub> Lasers"; Applied Optics, 10, 1, 144~149, 1971.1
- 19) S. Saito et al.; "The Laser Current Transformer for EHV Power Transmission Lines"; IEEE Trans. QE, QE-8, 255, 1966.8
- 20) 斎藤ほか「レーザによる電力用電流電圧測定装置に関する基礎的研究」東大生研報告 28, 5, 昭和55年3月
- 21) 斎藤ほか「レーザ・コマンド装置」東大宇宙研報告 5, 2(B) 416~440, 1969.7
- 22) 斎藤ほか「電波誘導システム 特集号」東大宇宙研報告, 12, 1(B), 1976.3
- 23) 斎藤ほか「M-3C型ロケット搭載アンテナ系について」東大宇宙研報告 9, 1(A), 1~18, 1973.1
- 24) S. Saito et al.; "Orbit Determination for the Scientific Satellite in Japan"; Proc. 9th ISTS, 729~736, 1971
- 25) 斎藤ほか:「鹿児島宇宙空間観測所の発射用地上設備について」東大宇宙研報告, 2, 1(B), 247, 1966.3
- 26) 斎藤、野村ほか:「観測ロケット特集号-KSC地上設備」東大宇宙研報告, 5, 2(B), 1969.7
- 27) 斎藤ほか:「科学衛星光学トラッキング装置 I, II」東大宇宙研報告, 10, 3(A), 1974.7  
その他東大宇宙研報告の観測ロケット特集号多数
- 28) 斎藤:「科学観測用ロケットの発展の経過 7-観測ロケットの発達と科学衛星計画の進展」日本航空宇宙学会誌, 26, 299, 618~629, 1978.12: 27, 300, 19~28, 1979.1 および 27, 302, 127~135, 1979.3
- 29) 高木、斎藤、野村:「東京大学に於けるスペース・エレクトロニクスの開発研究」電子通信学会誌, 50, 6, 137, 昭和42年6月
- 30) 斎藤:「わが国の科学衛星について」電子通信学会誌, 55, 7, 869~877, 昭和47年7月
- 31) 宇宙開発委員会編「我が国の宇宙開発のあゆみ」昭和53年8月

### 研究項目一覧

#### I 高周波誘電加熱の研究

- (1) 高周波誘電加熱の基礎的研究 昭和21~25年
- (2) 高周波加熱によるベニヤ合板の製造 昭和22~26年

#### II マイクロ波通信の先駆的研究

- (1) マイクロ波帯における誘電体特性の測定に関する研究 昭和22~30年

- (2) 定在波法によるインピーダンス測定の研究 昭和26～30年
- (3) マイクロ波帯の含湿空気誘電特性の測定 昭和28～30年
- (4) 電力会社専用マイクロ波通信の伝ぱん実験 昭和28～30年
- Ⅲ 電力線搬送に関する研究
  - (1) 電力線搬送のアンテナ結合に関する研究 昭和26～29年
  - (2) 模型送電線による電力線搬送の分布結合に関する研究 昭和27～31年
  - (3) 送電線による電波障害に関する研究 昭和27～30年
- Ⅳ マイクロ波低雑音受信と大型パラボラ・アンテナの開発研究
  - (1) マイクロ波帯電子ビーム雑音パラメータの測定 昭和30～37年
  - (2) マイクロ波帯ショット雑音軽減係数の理論的、実験的研究 昭和37～46年(藤井, 岩本)
  - (3) マイクロ波帯低雑音 TWT の試作 昭和30～40年
  - (4) パラメトリック増幅器の開発研究 昭和33～45年
  - (5) 大型パラボラ・アンテナの開発研究 昭和35～45年
- Ⅴ レーザ光に関する先駆的研究
  - (1) レーザ光検波に関する研究
    - a) 光検波パラメトリック増幅器の研究 昭和37～41年
    - b) 光検波進行波増幅管の研究 昭和37～43年(小川)
    - c) 焦電型光検波器に関する研究 昭和40～45年(小関)
    - d) 焦電型光検出・超音波パラメトリック増幅器に関する研究 昭和40～45年(小関)
  - (2) レーザ光変調に関する研究
    - a) 進行波型光位相変調器に関する研究 昭和37～42年(木村)
    - b) 新しい光変調結晶  $\text{LiIO}_3$  の育成に関する研究 昭和47～48年
    - c) GaAs Franz-Keldysh 効果を用いた  $\text{CO}_2$  レーザ変調に関する研究 昭和40～45年(小関)
    - d) Ne-He レーザの電流変調に関する研究 昭和42～44年(上原)
  - (3) レーザ光電磁回路素子に関する研究
    - a) 精密光可変減衰器の開発 昭和36～40年
    - b) 光サーキュレータの開発 昭和37～45年
    - c)  $\text{CO}_2$  レーザ用精密可変減衰器の開発 昭和40～43年(小関)
    - d) 光ファイバ用方向性結合器の研究 昭和47～49年(桑原)
    - e) 周期構造をもつ光導波路に関する研究 昭和49～55年(我妻)
  - (4) レーザ光電磁回路アナライザに関する研究 昭和48～55年
  - (5) レーザ CT, PT の開発研究
    - a) レーザ CT の開発研究 昭和41～55年
    - b) レーザ PT の開発研究 昭和41～55年
    - c) マイクロ波 CT の開発研究 昭和41～50年
  - (6) レーザ光の測量への応用に関する研究
    - a) レーザ・トランシットの開発 昭和40～43年
    - b) 変調位相差測定法によるレーザ測距装置の開発 昭和44～46年(武田)
  - (7) レーザ光大気汚染計測に関する研究
    - a) インコヒーレント光ヘテロダイン検波方式 昭和48～53年(四方, 山下)
    - b) 同調可能色素レーザ光による吸収スペクトル測定方式 昭和51～53年(松村)
  - (8) 宇宙飛しょう体のレーザ・トラッキングシステム
    - a) レーザ・トラッキング装置の開発 昭和39～45年
    - b) 宇宙飛しょう体搭載用コーナ・キューブ反射プリズムの開発 昭和42～45年および昭和51～55年
  - (9) レーザ・コマンド装置の開発研究 昭和39～42年
  - (10) 人工衛星光学トラッキング装置の開発 昭和45～47年
  - (11) レーザ光空間伝ぱんならびにレンズ伝送系の研究
    - a) レーザ光空間伝ぱん実験 昭和41～50年

b) レーザ光のレンズ伝送系伝ばん特性の研究

昭和42～50年

## VI 宇宙開発に関する開発研究

(1) ロケット追跡レーダと電波誘導システムの開発研究

a) ロケット追跡レーダの開発

昭和32～43年

b) 電波誘導システムの開発研究

昭和42～50年

(2) 観測ロケットおよび科学衛星アンテナの開発研究

a) 観測ロケット用アンテナの開発研究

昭和43～55年

b) 科学衛星アンテナの開発研究

昭和39～55年

(3) 科学衛星追跡システムの開発研究

昭和39～55年

(4) 科学衛星打ち上げシステムとKSC地上施設・設備の開発

昭和36～55年

(5) 宇宙通信用低雑音受信装置および大型パラボラ・アンテナの開発研究

昭和33～45年

(6) レーザ光の宇宙通信への応用に関する開発研究

昭和39～55年

(7) 宇宙開発長期ビジョンの作成

昭和50～52年

( ) 印内は大学院学生名を示す。

