NHK 技 研 の 電 波 無 響 室

NHK 技術研究所 村 上 一 郎

NHK 技研が独自のアイデアと技術をもって最近完成した電波無響室を紹介する意味で、ここで用いられている壁材製作の3原則、その実現方法などを説明し、またでき上がった電波無響室の構造、性質、施設、機能について概説している。周波数特性は300 Mc 付近で-20 dB でやや劣るが、その付近を除いた100 Mc から10,000 Mc 以上という広帯域で-28 dB 以下のすぐれた低反射広帯域特性をもっている。

NHK 技術研究所の新館が建設されるという話が出たときに、筆者等は「ぜひ電波無響室を作ってほしい」と要望した。当時、アメリカにはいくつかの電波無響室が作られていることがわかっていて、わが国には東京工業大学に小さいものができていたほか、東芝、三菱電機などで壁材の研究が行なわれているという段階であったから、この要望が採決されるまでには、かなりの曲折があったのはぜひもないことであらう。しかし、昭和35年の初めに電波無響室を設けることがきまり、壁材の研究はもちろん、電波無響室の設計、施工の指導監督、施設など一さいを自主的に行なうようにとの命令で、われわれの仕事は、にわかに忙しくなった。

電波無響室というのは、室の壁面、天井および床に、ある限られた周波数帯に対してではあるが、電波反射率の十分低い材料を貼付けることによって、有限の空間に近似的に自由空間を実現したものであるといつてよい。このような室で、空中線の指向性、空中線インピーダンス、物体からの回折、ある材料の反射率などの測定を行なえば、まわりからの反射波によって乱されることがないから信頼度の高い結果が得られる。

従来、空中線の指向性などの測定は、まわりに建物や樹木などのない広場で行なっているが、そのようにしても大地の影響は避けがたく、とくに雨や雪や風などのために実験ができなくなったりして不便が多かったが、電波無響室によってこのような不便や非能率が除かれるのは最も重要なことである。

最近、ATT が打ち上げて欧米間のはじめてのテレビジョン中継実験に成功したテルスターの無線関係の調整は、ホルムデルにあるベルの研究所の電波無響室でなされたと伝えられているが、このように電波技術の高度化にともなって、電波無響室がほしいという要求は次第に

増加しつつある。

電波無響室建設がきまるや否や、まず部内の有識者に集まってもらって情報を語り合い、知恵を出してもらった。そして、やがて東京工業大学の森田教授に研究協力を依頼し、次年度は同大学の竜谷助教授に引き継いでもらって自主的に研究を進めてきた。

筆者等は戦時中、海軍技術研究所に徴用され飛行機、潜水艦をはじめ、いろいろの物体からの電波の反射について研究していたが、やがて戦況も不利になったころ、ガダルカナルへの補給任務にあたられたある潜水艦長の血のにじむような苦心談を聞くにおよび、潜水艦の「かくれ蓑」を作らねばならぬと思ひ立ち、やむにやまれぬ気持ちで「電波無反射材の研究をやらせてもらいたい」と上申した。その結果やいかにと考えている暇もなく、早速やれとのことで大車輪の研究を始め、半年あまりの間に材料の研究試作をはじめ、三回にわたる実装実験まで行なったが、お役にたつ前に戦は終わってしまった。その後十数年間、われわれの研究も日の目を見ないまま眠っていたが、電波無響室の研究開始とともにこれを引き出してみた。青写真の字はかなりうすれているが、そこにはいろいろのすぐれた考えが提案されており、いま考えてもそれらは正しく、また、あるものは新しくさえあった。われわれはこれらの考えを基にした試案を会合に持ち出し、検討、採決してもらって実験研究にとりかかったのである。

1. 壁材作製のための3原則

電波無響室を建設するためには、まずすぐれた壁材を得ることが先決であることはいふまでもない。つぎに、われわれが基準とした壁材研究の3原則について説明しよう。

(1) インピーダンス整合

2つの送電線を結ぶとき、それらの単位長あたりの自

“Radio Anechoic Chamber of NHK Technical Research Laboratories” by Ichiro Murakami

己誘導係数 $L_1(\text{H/m})$, $L_2(\text{H/m})$, 容量 $C_1(\text{F/m})$, $C_2(\text{F/m})$ がそれぞれ違っても, 両者の波動インピーダンスが等しい, すなわち

$$\sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = \sqrt{\frac{L_2}{C_2}} \quad (1)$$

なる関係があるときには, 一方から進んできた電波は反射なしに他方に進入することは, よく知られた事実である. これと同様なことが電波無響室の壁材についても成り立っている. 第1図のように1つの平面で限られた2つの均質等方媒質の一方 i を進んできた平面波がこの境界面に入射したとき, その一部は反射され, 残りは第2の媒質 j に進入して行く.

そのときの反射係数は, 垂直および水平偏波に対して

$$R_v = \frac{\sqrt{\frac{\mu_j}{\epsilon_j}} \frac{\cos \theta_i}{\sqrt{1-j\eta_j}} - \sqrt{\frac{\mu_i}{\epsilon_i}} \frac{\cos \theta_j}{\sqrt{1-j\eta_i}}}{\sqrt{\frac{\mu_j}{\epsilon_j}} \frac{\cos \theta_i}{\sqrt{1-j\eta_j}} + \sqrt{\frac{\mu_i}{\epsilon_i}} \frac{\cos \theta_j}{\sqrt{1-j\eta_i}}} \quad (2)$$

$$R_h = \frac{\sqrt{\frac{\mu_i}{\epsilon_i}} \frac{\cos \theta_i}{\sqrt{1-j\eta_i}} - \sqrt{\frac{\mu_j}{\epsilon_j}} \frac{\cos \theta_j}{\sqrt{1-j\eta_j}}}{\sqrt{\frac{\mu_i}{\epsilon_i}} \frac{\cos \theta_i}{\sqrt{1-j\eta_i}} + \sqrt{\frac{\mu_j}{\epsilon_j}} \frac{\cos \theta_j}{\sqrt{1-j\eta_j}}} \quad (3)$$

となる.

ただし ϵ_i, ϵ_j は媒質 i, j の誘電率 (F/m), μ_i, μ_j はそれらの導磁率 (H/m) で

$$\eta_i = \frac{60\lambda\sigma_i}{\epsilon_i\epsilon_0}, \quad \eta_j = \frac{60\lambda\sigma_j}{\epsilon_j\epsilon_0}$$

で σ_i, σ_j はそれぞれの導電率 (S/m) である. ここに ϵ_0 は真空の誘電率 $(1/36\pi) \times 10^{-9} \text{F/m}$ である.

(2)(3)式からわかるように, R_v, R_h はもちろん両媒質の電磁常数, 周波数のほか入射角 θ_i に関係し, $\theta_i = 0$, すなわち垂直入射の場合には*

$$R_v = -R_h = \frac{\sqrt{\frac{\mu_j}{\epsilon_j}} \frac{1}{\sqrt{1-j\eta_j}} - \sqrt{\frac{\mu_i}{\epsilon_i}} \frac{1}{\sqrt{1-j\eta_i}}}{\sqrt{\frac{\mu_j}{\epsilon_j}} \frac{1}{\sqrt{1-j\eta_j}} + \sqrt{\frac{\mu_i}{\epsilon_i}} \frac{1}{\sqrt{1-j\eta_i}}} \quad (4)$$

となり, また $\theta_i \rightarrow 90^\circ$, すなわちすれすれ入射の場合には

$$R_v \rightarrow -1, R_h \rightarrow -1 \quad (5)$$

となる. 第2図は $|R_v|, |R_h|$ と θ_i との関係の例を示すもので, $|R_h|$ は θ_i が 0° から 90° に増加するにしたがって, (4)式の値から1へ単調に移り, $|R_v|$ は(4)式の値から減少して極小値をとってから急に1へ移る. これらの式からわかるように, 反射率をできるだけ小さくするためには媒質 j の固有インピーダンス $\sqrt{\mu_j/\epsilon_j}$ を媒

第1図 電波の反射と屈折

第2図 入射角と反射率との関係

質 i のそれ $\sqrt{\mu_i/\epsilon_i}$ にできるだけ近づけるとともに, η_j を η_i に近づけることが必要で十分である.

いま

$$\sqrt{\frac{\mu_i}{\epsilon_i}} = Z_i, \quad \sqrt{\frac{\mu_j}{\epsilon_j}} = Z_i + \Delta Z_i; \quad \Delta Z_i \ll Z_i \quad (6)$$

$$\eta_j = \eta_i + \Delta \eta_i; \quad \Delta \eta_i \ll 1 \quad (7)$$

とすれば

$$|R_v|_{\theta_i \neq 0} \approx |R_h|_{\theta_i \neq 0} \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta Z_i}{Z_i} + j \frac{\Delta \eta_i}{4} \quad (8)$$

となる. この式は偏波のいかんにかかわらず $\theta_i \neq 0$ での反射率が, 固有インピーダンスの不整合の割合 $\frac{\Delta Z_i}{Z_i}$ と η_i の不整合 $\Delta \eta_i$ とにどのように関係するかを定量的に示すもので, 壁材設計の基礎となる重要な式である. たとえば $\frac{\Delta Z_i}{Z_i} = 0.02$, $\Delta \eta_i = 0$ としても $\frac{\Delta Z_i}{Z_i} = 0$, $\Delta \eta_i = 0.04$ としても $|R_v|_{\theta_i \neq 0} \approx |R_h|_{\theta_i \neq 0} \approx 0.01$ であり, $\frac{\Delta Z_i}{Z_i} = 0.02$, $\Delta \eta_i = 0.04$ とすれば $|R_v|_{\theta_i \neq 0} \approx |R_h|_{\theta_i \neq 0} \approx 0.014$ となる.

特別の場合として, $i=0$ を空気, $j=1$ を壁材とすれば

$$\sqrt{\frac{\mu_1}{\epsilon_1}} \approx \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \Omega \quad (9)$$

$$\eta_1 \equiv \frac{60\lambda\sigma_1}{\epsilon_1\epsilon_0} \ll 1^{**} \quad (10)$$

とすることによって, $\theta_i = 0$ における反射率を十分小さくすることができる***. もし壁材の厚さを問題にしない

** (B)から

$$k_1 = k_0 \sqrt{\kappa_1^* \kappa_1} \sqrt{1-j\eta_1}; \quad \kappa^* = \frac{\mu_1}{\mu_0}, \quad \kappa = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_0} \quad (C)$$

ただし μ_0 は真空の導磁率で, k_1, k_0 は媒質 1, 0 の伝播常数である.

*** 第2図からわかるように, $\theta_i \rightarrow 90^\circ$ のとき $|R_v| \rightarrow 1$, $|R_h| \rightarrow 1$ となることは, 両媒質が異なる限り避けられないのであるが, θ_i のなるべく広い範囲で $|R_v|, |R_h|$ を小さく保つためには (9)(10)式のほかに $\sqrt{\mu_1\epsilon_1}$ を $\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$ になるべく近付けることも必要である.

* Snell の法則: $k_i \sin \theta_i = k_j \sin \theta_j$ (A)

ただし $k_i = \sqrt{\omega^2 \mu_i \epsilon_i - j \omega \mu_i \sigma_i}$, $k_j = \sqrt{\omega^2 \mu_j \epsilon_j - j \omega \mu_j \sigma_j}$ (B)

よって $\theta_i \rightarrow 0$ のとき $\theta_j \rightarrow 0$ となる.

第3図 成層と全反射の利用

ければ、これですぐれた壁材が得られることになる。

しかし実際には壁材の厚さはできるだけ薄くすることが必要である。壁材が厚ければそれだけ室の有効寸法が小さくなり、また材料も多くいることになって値段も高くなり、工事も手間どることになる（この要求を満たすためには、第3図のような成層による厚さの減少が考えられる）。

(2) 成層

これは逆に、同じ厚さで有効周波数帯の下限を下げうることをも意味する。この場合、(9)式で表わされるインピーダンス整合を各層について保つ必要がある。すなわち

$$377\Omega \equiv \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \div \sqrt{\frac{\mu_1}{\epsilon_1}} \div \sqrt{\frac{\mu_2}{\epsilon_2}} \dots \div \sqrt{\frac{\mu_n}{\epsilon_n}} \quad (11)$$

としなければならない。そのうえで

$$3 \times 10^8 \text{ m/s} \equiv \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} > \frac{1}{\sqrt{\mu_1 \epsilon_1}} > \frac{1}{\sqrt{\mu_2 \epsilon_2}} > \dots > \frac{1}{\sqrt{\mu_n \epsilon_n}} \quad (12)$$

で表わされるように、つぎつぎに密にして行き、さらに

$$1 \gg \frac{60\lambda\sigma_1}{\epsilon_1/\epsilon_0} \div \frac{60\lambda\sigma_2}{\epsilon_2/\epsilon_0} \div \dots \div \frac{60\lambda\sigma_n}{\epsilon_n/\epsilon_0} \quad (13)$$

とすれば、媒質1の表面からだけでなく、つぎつぎの境界面からも反射はおこるが、それらのおおのを十分小さくすることができ、それらが空気中にもどるまでには媒質内で吸収*されて十分小さくなる。だから、これら空気中にもどるすべての成分が重畳してできる反射波の強度を、実際に許せる限度内にとどめることができる。

(12)式が示すとおり、層はだんだん密になっているから、それらの実際の寸法は小さくても空気に換算して考えると十分厚い材料に相当しており、(D)(11)(12)および(13)式からわかるように吸収もますます大きくしてあるから、実際上の厚さは大いに縮小できる。

実は一般の媒質では μ も ϵ も周波数の関数であって、周波数が低いほど μ も ϵ も大きいのが普通であるから

* 電波が媒質 i の単位長を伝搬するとき受ける減衰は

$$e^{-\sqrt{\frac{\mu_i}{\epsilon_i}} \frac{\sigma_i}{2}} \quad (D)$$

で与えられる。

この効果によって厚さをさらに縮小することができ、逆に厚さを固定して考えれば有効周波数帯の下限をさらに下げることが可能になる。

ここまでは電波無響室壁材製作の常識ともいうべきもので、いままでに開発された壁材の多くはこれらの原則の少くとも一部を利用している。

しかし、われわれは第3の独自ですぐれた考案を生かしている。それは全反射の利用**である。

(2) 全反射の利用

第1図について媒質 i の中から境界面に斜に入射した電波が媒質 $j=i+1$ に透過して行くとき、Snellの法則(A)が成り立つことはいうまでもない。そして媒質 i とつぎの媒質 $j=i+1$ について(12)(13)式の関係が成り立っている場合には(B)(C)式を参照することによって明らかのように、 $\frac{k_{i+1}}{k_i}$ はほとんど実数で、しかも1より大きい。したがって(A)式から $\theta_{i+1} < \theta_i$ となる。ゆえに第3図のように(11)(12)(13)式が成り立つように作られた成層では、空気中から斜に入射した電波も壁材内に入進するにしたがって吸収によって減衰するとともに、次第に立ってき、また速度も次第におそくなっていくことになる。だから最後の最も密な層に密着して適当な寸法、形の波形金属板（または金属泊）をおくことによって、ここに入射した電波は斜に反射され、それが進むにしたがって境界面への入射角は前に説明したと同様の理由によって、次第に大きくなり、ある値をこえると全反射をおこし、空気中へはもどれなくなる。(A)式で

$$\left. \begin{aligned} 90^\circ > \theta_{i+1} > \sin^{-1} \frac{k_i}{k_{i+1}} \\ \text{ただし } \frac{k_i}{k_{i+1}} \text{ は実数で } < 1 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

であれば、 θ_i は実数ではありえなくなって、 $i+1$ の媒質から θ_{i+1} なる入射角で i の方に入射した電波は、その境界面で全反射を受けるわけである。すなわち、このような電波のエネルギーは外へ出られなくなる。この効果を利用することにより壁材の厚さをさらに減小することができ、低反射特性は一そう増進され、とくに有効周波数帯の上限を引き上げるのに大きな効用がある。

2. 実際の壁材

以上、壁材作製についての3原則を説明したが、これらをどのようにして実現するかがつぎの問題である。実現の筋道は、いわば無限にありうるわけであるが、実際には入手しやすい材料を用いて

- (1) できるだけ安く、
- (2) 特性がすぐれており、

**特願昭 35-25169 広帯域電波無反射壁

なものを作る必要がある。そのほか重くないこと、火災に強いことなども重要である。それがためには、前記の原則をある程度ゆるめることもやむをえないことがあろう。いろいろ考え研究した末に、われわれは壁材の表面に近い方には東京工業大学教授森田清先生の発明で大和ゴム化工株式会社が製造販売しているサンルフレーットの素材を利用することにし、奥の部分には Fe_3O_4 に 3 段階の黒鉛を混ぜた 3 種の粉をポリスチレンの箱に 3 層につめて用いることにした。

サンプルプレートはポリスチレンの粉を発泡させて小豆大の粒のそろったものを選び出し、黒鉛と糊とを混ぜてドロドロにしたものの適量を一様にまぶし、それらを約 $60\text{cm} \times 90\text{cm} \times 5\text{cm}$ の金型にみたして、水蒸気で加熱することによってポリスチレンをさらに発泡膨脹させ、かつ乾燥させて作ったもので「岩おこし」を想像されればよい。ポリスチレンの量と黒鉛の量との比によって材料に番号がつけられており、番号の大きいほど黒鉛の量が少く、材料の導電率 σ はほぼ等比級数的に減少している。商品サンプルプレートは 1~10 番の各 1.5 cm の板を順にはり合わせて、上面には黒鉛の全く入っていない化粧板 1 cm が貼付けられ、厚さ 16 cm で有効周波数帯域は $3,700 \sim 6,000\text{ Mc}$ となっている。われわれが利用したのは黒鉛の量の少い方の素材で、表面に近いものとしては黒鉛のさらに少い 12 番を作り、表面から

$$12 \text{ 番} \times 4.5 \text{ cm} + 10 \text{ 番} \times 4.5 \text{ cm} + 9 \text{ 番} \times 4.5 \text{ cm} \\ + 8 \text{ 番} \times 4.5 \text{ cm}$$

を用いた。もちろん表面には黒鉛の全く入っていない、しかも自己不燃性のもの 1 cm を貼付けた。

さて、奥の方は約 30 cm×30 cm×11 cm のポリスチレ

①ポリスチレン製箱主体
②上蓋（ポリスチレン）、③下蓋（波形鉄板）
④箱完成品、⑤ Fe_3O_4 つめみ込完成品
⑥サンルフレート素材

写真 1 ポリスチレン製箱とサンルフレート素材

第4図 箱取付け用レール (単位 mm)

第5図 電波無響室壁面の構成

ン製の箱（三菱樹脂株式会社製）に、 Fe_3O_4 （武内工業株式会社製）に 3 段の量の黒鉛（日本黒鉛工業株式会社製）を混ぜた 3 種の粉を 3 段につめ（岩井産業株式会社作業）、ポリスチレン製の上蓋と波形鉄板製の下蓋とをしている。黒鉛の量はもちろん奥に行くほど多くなっている。 Fe_3O_4 は Fe_2O_3 （ベンガラ）を還元して作られたもので、導磁率 $\mu(\gg\mu_0)$ をもっているばかりでなく、誘電率 $\epsilon(\gg\epsilon_0)$ をもっているのも、完全ではないがインピーダンス整合がとれている。写真①はポリスチレンの箱、②は上蓋、③は下蓋（鉄製波形板）を示し、④はこれらを組立てたもの、⑤は粉をつめて箱を完成したもの、⑥はサンプルレートの素材である。

実は、箱の下方は一方の方向で狭ばまっており、鉄板製の下蓋がややとび出した形になってフランジを兼ねている。だから第4図のようなレールを 30.25 cm の等間隔に平面上に取付け、その溝に上記の箱のフランジをはめて移動配列することによって、箱は容易に、しかも整然と取付けられる。そして、その上にサンプレート（貼付け）するのである。第5図はレールの取付け、箱の配

第6図 電波無響室平面図

列，サンプルプレートの貼付けの様子を示している。

3. 電波無響室の構造と施設，機能

電波無響室に割当てられた室は床面積約 140 m²，3階吹きぬけの空間と，中階南側に付属した約 70 m²の測定室とである。実際には第6図に示されているように幅 2 mのL形の回廊があり*，またその角には螺旋階段があって，下階から中階を経て天井の上まで昇降できる。Aの位置には写真2のような空中線回転台があって，空

←写真2 空中線回転台とバリケード

写真3 空中線指向性測定装置パネル

中線から電波を放射しながら回転させ，その電波をたとえば電波窓Eで受信し記録することによって，空中線の指向性を自動的に求めることができる。写真3は空中線指向性測定パネルである。

また天井には測定溝Bがあり，それによって移動できる発泡ビニールの角棒が下方に伸びていて(写真4)，それにそって上下に移動できるカーソルがあり，それに探針をのび出して装着することができるから，台地による電界の変化の様や，台地の陰での電界の弱まり方などを模型的にくわしく測定することができるし，また棒にそって動くカーソルにある物体，たとえば金属板を支持させて上下または左右に移動し，電波窓 C-D 間の電波をさえぎることによって金属板によるしゃへい効果を自動的に求めることなどができる。この棒は塩化ビニルを体積比で約 30 倍に発泡させて作った硬質のもので， $\epsilon/\epsilon_0=1.03$ くらいで1に非常に近いから，それによる空間の電界の乱れは十分小さくなっている。写真5は探針，物体移動制御パネルである。また床にいろいろの材料をおき，測定溝を通して電波を投下し，測定溝Fによりその上の電界強度のハイトパターンを取ることによって，その材料の反射率を求めることができる。その他，いろいろの用途に役立てることができる。

* 外に廊下がないのでやむをえず作った。

↑第7図 電波無響室反射率測定結果 (床上3 m)

①測定溝（天井）、②発泡ビニール棒（左右に移動）、③カーソル（②にそって上下に移動）、④支持されたアル板

写真4 探針、物体移動装置

第7図はこの電波無響室壁面の反射率と周波数との関係の測定値を示す。この図からわかるように約100 Mc以上の周波数で反射率は0.1 (−20 dB) 以下になっており、約300 Mcの付近を除けば−28 dB 以下で、すぐれた特性となっている。

4. む す び

電波無響室を作るということが決定されてから2年有半、約100 Mcから10,000 Mc 以上という広帯域にわた

写真5 探針、物体移動制御パネル

ってすぐれた低反射特性をもつ壁材を、独自のアイデアと方法によって研究完成し、それを用いての電波無響室の設計、施工という大きな仕事を1つの事故もなしになしとげられたことは誠にありがたいことであり、喜ばしい限りである。いまや空中線回転台や探針移動装置などの施設も完成し、いよいよ実動のときとなった。電波無響室を有効に利用していろいろの研究が行なわれ、大いなる成果が得られることを心から祈っている。

この研究、設計、施工に協力され、また励ましを与えられた部内外の多くの方々に深甚の感謝を捧げる。

(昭和38年5月30日受付)

(31 頁より続く)

- 4) 動作が安定である。
- 5) ダイオード対回路は結合抵抗をふくめてすべてプリント板に収容されていて、その互換性も高いので保守が容易である。

つぎに各種テレビジョン信号のPCM化について得られた結果をまとめて示すと、つぎのとおりである。

- 1) 白黒信号ではほとんどの画像において6ビットで十分である。
- 2) NTSC方式カラー信号では、(a)副搬送波は明度信号に対しWobbling効果を果す、(b)5ビットでほぼ良好に伝送される、(c)4ビットと3ビットの間で大きな差違が認められる、(d)3ビットでは色度信号の欠除が目立ってくる。

なお今後もカラーテレビジョン信号のPCMについて種々の検討を続けて行く予定であるが、その課題としては、NTSC方式カラー信号に対して最適なサンプリング周波数の選定、この場合のWobbling法の効果、Wobbling周波数の選定、色度信号に対する瞬時圧伸の効果の検討、またカラー信号のNTSC方式以外の方式

でのPCMとの比較検討などがある。

終りに本装置の開発研究、試作および製造にあたって終始御指導御協力賜った国際電電研究所の諸氏をはじめ、関係者各位に深く感謝する次第である。

(昭和38年7月30日受付)

〔参考文献〕

- 1) 大島、榎本、天野：テレビジョン信号のPCM、通信方式研究専門委員会資料、(July, 1961)
- 2) 大島ほか：試作テレビ信号デジタル変換器、信学会全国大会(1962) No.611.
- 3) 東大超高速計算機研究会：江崎ダイオードによる超高速計算機の可能性について、電子計算機研究専門委員会資料 (Oct. 1959)
- 4) 榎本、渡辺、天野：エサキダイオードを用いた論理回路、電子計算機研究専門委員会資料、(May, 1960)
- 5) 大島、榎本、天野：エサキダイオード論理回路の諸特性、トランジスタ研究専門委員会資料、(Oct. 1960)
- 6) 喜安ほか：エサキダイオード対の不平衡特性、信学誌、43, 9, (1960), 23~29
- 7) 天野：エサキダイオード対論理回路のマージン、電子計算機研究専門委員会資料、(Jan. 1962)
- 8) 阿部、田尻、太田：切換式並列形A-D変換器、電気四学会連合大会(1963), No.1594.
- 9) Goodall, W.M.: Television by Pulse Code Modulation. Bell Syst. Techn. J. 30 Jan., (1951), 33~49.
- 10) Carbrey, R. L.: Video Transmission Over Telephone Cable Pairs by Pulse Code Modulation. Proc. IRE. 48. Sept. (1960), 1546~1561.