

工学基礎研究 報告書

電子制御工学科 4 年 学籍番号 36 番
松原 基行

提出日: 2001/02/16

1. はじめに

本研究の目的は、研究の基本的な事柄を学ぶことから卒業研究の準備をするというところまでを行うことである。

本研究で行った具体的な内容は以下のとおりである。

まず 10 月初旬に研究テーマを決定するという目的で課題が与えられた。また、この課題と並行して行ったのが木下是雄著の『理科系の作文技術』の要約である。これは、論文を作成していくに当たって必要不可欠な作文技術について学ぶためという目的で行った。

そして、11 月下旬から卒業研究の準備を行った。ここでは、卒業研究で誘電体を取り扱うことになったので、それに向けて物質の誘電特性を表わす重要な物理量である誘電率の測定原理について学習した。

2. 研究テーマの模索

以下に、研究テーマを決定するための課題に対するレポートを示す。

2.1 自己能力分析

2.1.1 物理学の理解度はどの程度であるか？以下の電磁気学で扱う現象を例にして、どのようなことが起こっているか説明せよ。これをもとに判断せよ。

講義内容は十分理解している。

【問題】誘電率 ε の物質を加工し、平行平板コンデンサー（極板面積 $A[\text{m}^2]$ 、極板間距離 $d[\text{m}]$ ）としたとき、次の質問に答えよ。

(a) このコンデンサーの静電容量 C を書け。

静電容量 C は極板面積に比例し、極板間距離に反比例するので

$$C = \varepsilon \frac{A}{d}$$

(b) このコンデンサーの両極板に $V[\text{V}]$ の電圧をかけたとき、蓄えられるエネルギーはどれほどか？

電荷 dq が電位差 V を移動するのに必要な仕事 dW は

$$dW = Vdq = \frac{q}{C} dq$$

であるので

$$W = \int_0^Q dW = \frac{1}{C} \int_0^Q q dq = \frac{Q^2}{2C} = \frac{1}{2} CV^2$$

(c) 極板間を真空（誘電率 ε_0 ）にした形状の全く同等なコンデンサーと、問題に与えられているコンデンサーで蓄えられるエネルギーの比を求めよ。

(a)、(b)より、誘電率 ε のコンデンサーで蓄えられるエネルギー W は

$$W = \frac{1}{2} \varepsilon \frac{A}{d} V^2$$

であり、誘電率 ε_0 のコンデンサーで蓄えられるエネルギー W_0 は

$$W_0 = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \frac{A}{d} V^2$$

である。従って、両者の比は

$$\frac{W}{W_0} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$$

(d) 誘電体に静電場を印加したときに、誘電体内部で起こる現象について詳しく論ぜよ（物性物理的見地から述べよ）。

誘電体に電場が印加されると、無極性分子（永久的な電子双極子モーメントを持たない誘電体の分子）ならば、分子がわずかに分極し電気双極子モーメントが生じる。また、有極性分子（永久的な電気双極子を持っている誘

電体の分子)では、電場の印加されていないときは、各分子がランダムな方向に向いているが、電場が印加されると、電気双極子にトルクが作用し、その結果、分子は電場の方向に揃おうとする。電場方向へどの程度揃うかは、温度および加えた電場の強さに依存する。一般に、その揃い方は、低温になるに従って、また、電場の強さを増すに従って増大する。

すなわち、一様な電場内におかれた誘電体は、分子の正電荷は電場と同じ方向に、負電荷は電場と反対の方向に移動する。それゆえ、加えた電場によって誘電体が分極する。これを誘電分極という。

2.2.2 Lab-class(学生実験)への取り組みに関して？

& 実験では、その内容によって中心になったり、リーダーに従ったりして取り組んだ。

【問題】以下の実験に関して、設問に答えよ。

回路素子の持つインピーダンスをインピーダンスメータなどで測定し、そこからレジスタンス(純抵抗成分)とリアクタンス成分を簡単に求めることができる。この測定原理について説明せよ。次のような R と C の直列回路、並列回路に関して次の問いに答えよ。

(a) 抵抗 R とコンデンサー C の直列回路において、インピーダンス Z を求めよ。

インピーダンス Z を複素数で表現すると、次式のようになる。

$$Z = R - j \frac{1}{\omega C}$$

したがって、インピーダンスの大きさは

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} = R \sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega RC}\right)^2}$$

となる。ただし、 ω は角周波数とする。

(b) インピーダンス Z を周波数 f の関数としてグラフを書け。

上記の式と、角周波数 ω と周波数 f の関係式

$$\omega = 2\pi f$$

から、インピーダンス Z の大きさは

$$|Z| = R \sqrt{1 + \left(\frac{1}{2\pi f RC}\right)^2}$$

となる。したがって、上式をデシベルゲインで表現すると

$$\begin{aligned} g_{dB} &= 20 \log(|Z|) \\ &= 20 \log R + 10 \log \left\{ 1 + \left(\frac{1}{2\pi f RC} \right)^2 \right\} \end{aligned}$$

となる。ここで、RC について場合分けをして考えることにする。

() $1/2\pi fRC \ll 1$

このとき, $1 + (1/2\pi fRC)^2 \approx 1$ であるので, $g_{dB} = 20\log R$ となる.

() $1/2\pi fRC = 1$

このとき, $1 + (1/2\pi fRC)^2 = 2$ であるので, $g_{dB} = 20\log R + 10\log 2 = 20\log R + 3$ となる.

() $1/2\pi fRC \gg 1$

このとき, $1 + (1/2\pi fRC)^2 \approx (1/2\pi fRC)^2$ であるので,

$$g_{dB} = 20\log R + 20\log \frac{1}{2\pi fRC} = 20\log \frac{1}{2\pi fC}$$

となる.

以上の議論より, インピーダンス Z をデシベルゲインで周波数 f の関数としてグラフにすると, 以下に示すようになる.

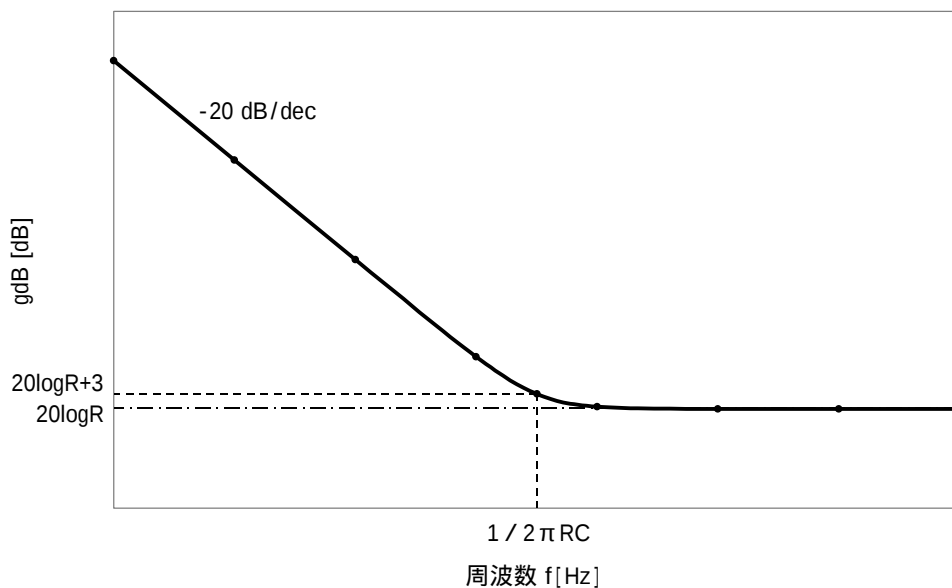


図 2.1 RC 直列接続のインピーダンスの周波数特性

(c) 抵抗 R とコンデンサー C の並列回路において, インピーダンス Z を求めよ.

インピーダンス Z を複素数で表現すると, 次式のようになる.

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C} = \frac{R}{1 + j\omega RC}$$

したがって, インピーダンスの大きさは

$$|Z| = \frac{R}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$$

となる。ただし、 ω は角周波数とする。

(d) インピーダンス Z を周波数 f の関数としてグラフを書け。

上記の式と、角周波数 ω と周波数 f の関係式

$$\omega = 2\pi f$$

から、インピーダンス Z の大きさは

$$|Z| = \frac{R}{\sqrt{1 + (2\pi f RC)^2}}$$

となる。したがって、上式をデシベルゲインで表現すると

$$\begin{aligned} g_{dB} &= 20 \log(|Z|) \\ &= 20 \log R - 10 \log \{1 + (2\pi f RC)^2\} \end{aligned}$$

となる。

ここで、 RC について場合分けをして考えることにする。

$$() \quad 2\pi f RC \ll 1$$

このとき、 $1 + (2\pi f RC)^2 \approx 1$ であるので、 $g_{dB} = 20 \log R$ となる。

$$() \quad 2\pi f RC = 1$$

このとき、 $1 + (2\pi f RC)^2 = 2$ であるので、 $g_{dB} = 20 \log R - 10 \log 2 = 20 \log R - 3$ となる。

$$() \quad 2\pi f RC \gg 1$$

このとき、 $1 + (2\pi f RC)^2 \approx (2\pi f RC)^2$ であるので、

$$g_{dB} = 20 \log R - 20 \log 2\pi f RC = 20 \log \frac{1}{2\pi f C}$$

となる。

以上の議論より、インピーダンス Z をデシベルゲインで周波数 f の関数としてグラフにすると、以下に示すようになる。

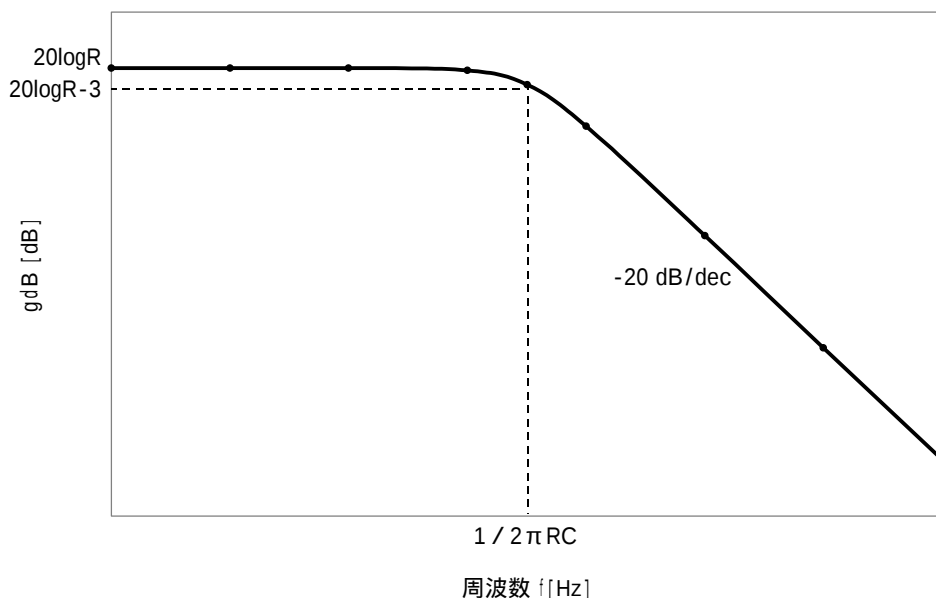
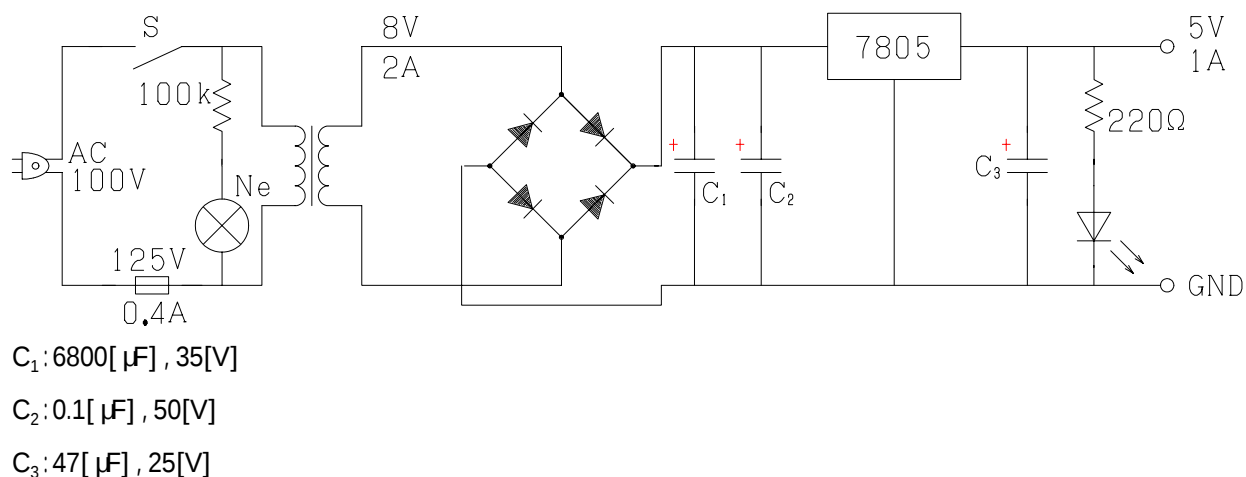


図 2.2 RC 並列接続のインピーダンスの周波数特性

2.2.3 電子回路, 電気回路を設計したり, 組上げたりする能力に関して

回路設計・製作は, (参考書を頼りに) 十分できる.

【問題】 次の電子回路について, 何を行う回路であるか, またどのような動作原理で行っているかわかりやすく説明せよ.



【答え】 この回路は電圧 5[V], 電流 1[A] を出力する直流電源である. また, 動作原理は以下に示す通りである.

まず, 家庭用電源 AC100[V] から, 8[V], 2[A] の電圧を AC トランスによって取り出す. このトランスを通過する電圧の大きさは以下の理由から設定した.

第一に, 3 端子レギュレータの入力電圧は定格出力電圧より高くなければ, 定電圧制御ができないからである.

第二に, 平滑コンデンサによってフラットになった波形も, リプル成分を持っていて, このリプルを持った波形の最も低いところ; リプル下限がある値以上でないと定電圧出力が得られず, リプルを含む出力になってしまうか

らである。しかし、下限を高くしすぎると、リップルがなくなったとしてもパワーロスが増えてしまうので、トランスの2次側電圧は、必要な直流電圧を最も効率よく引き出すことができる値にしなければならないのである。

次に、ブリッジ・ダイオードによってトランスの2次電圧を全波整流する。これは交流電源による正弦波(山と谷が交互に続く波形)をブリッジ・ダイオードによって、プラス側のみの波形(山が連なる波形)にすることを意味しており、電流の流れを回路に沿って追っていくことで、理解することができる。

ここで得られた波形を平滑コンデンサ C_1 によってフラットな波形にする。しかし、先程も述べたように、この波形ではまだリップル成分を持っているので、さらに次に控える3端子レギュレータによってさらに高い精度でフラットな状態にするのである。

この3端子レギュレータの両側についているコンデンサについて以下に説明する。

まず、左側についているコンデンサ C_2 は発振防止用コンデンサと呼ばれるものである。これは、3端子レギュレータが外部の浮遊インダクタンスと結合して発振するのを防止するためのコンデンサで、平滑コンデンサと3端子レギュレータが離れているときに追加すればよい。

また、右側についているコンデンサ C_3 は過渡応答改善用コンデンサと呼ばれ、その名の通り負荷の瞬時的な変動に対する過渡応答特性をよくするコンデンサである。

そして、出力部分に出力確認 LED がついていて、電圧が出力されていることを確認することができる。

最後に、電源近くにあるヒューズについても述べておく。このヒューズは AC 入力からトランス2次巻き線の出力までの間に起きる短絡に対して保護する役割がある。また、電源投入時の突入電流、及び3端子レギュレータの出力側の短絡時の過電流に対して耐えるという役割もある。

2.2.4 文献調査能力について

専門の文献を探し出す能力はある。

(どのような方法があるか書け)

まず、藤田研に探している専門書がないか調べる。

次に、岐阜高専の図書館でコンピュータの検索機能を利用して探す。

その次に、岐阜県立図書館、市立図書館などの主な公共施設のホームページにネットでアクセスし、探している専門書があるか検索する。あれば、そこへ行って借りる(前もってあることを確認してから行けば、無駄足にならずに済む)。

さらに、岐阜大学、名古屋大学、名古屋工業大学などの図書館にあるか、先程と同様に前もってあることを確認してから行き、そこでコピーをとるなり書き写すなりする。しかし、大学の図書館ともなれば、その量は膨大であるので、前もって確認できない可能性がある。従って、あることが確認できなくても行く価値はある。

また、人脈を伝えていける人ならば、その専門を扱っている大学教授とコンタクトを取り、関連の専門書を取り寄せることも可能である。

近くにあり、タダで得られる専門書でないことがわかれば、購入するしかない。そうだとすれば、ネット通販などが手取り早い。しかし、信頼性などで不安があるならば、専門書を扱う本屋に行ってみるのがいいだろう。)

【問題】次の現象について、解説した文献を探して来なさい。一般的な説明、解説程度の文献、専門分野の論文誌に記載されている文献などを調査せよ。

(a) 強誘電体の構造相転移に関してその概要を述べている文献を調査せよ。

中村 輝太郎・作道 恒太郎・石橋 善弘・富永 靖徳;物性科学選書 強誘電体と構造相転移,(裳華房,1988)

(b) KDP の結晶構造と、強誘電構造相転移の機構について研究した論文を検索せよ。

水素結合結晶(KDP)の強誘電相転移;FUJII K(Okayama univ. Sci.), J. Phys. Soc. Jpn. (JPN), 63[4], 1572(1994)。

KDP 型強誘電体での相転移の臨界挙動;Rodriguez J A(Colombia univ. Bogota COL.), Phys. Rev. B (USA), 50[1], 536(1994)。

KDP の水素の分布とトンネルの可能性;野田 幸男(千葉大 理), KEK Proc. (JPN), [92-3], 14(1992)

(c) 誘電率を測定することで、物質のどのような状態が分かるか解説してある文献を探し、レポートせよ。

【文献】電気学会通信教育会;電気学会大学講座 誘電体現象論,(電気学会,1973)p.83

【レポート】

電圧 V と電極間に蓄えられる電荷 Q との関係は

$$Q = CV$$

である。また、静電容量 C は電極の形状・寸法による定数 K と誘電率 ϵ との積で

$$C = \epsilon K$$

である。したがって、簡単のために電極の面積 A 、電極の間隔 d の平行板コンデンサであれば

$$K = \frac{A}{d}$$

であるので

$$\frac{Q}{A} = \epsilon \frac{V}{d}$$

となる。ここで、電極電荷の表面密度を q 、電界の強さを E とすると

$$q = \epsilon E$$

となる。

さて、コンデンサの電極間に誘電体を置いたとき、誘電体を構成する原子または分子の中の正電荷は電界と同じ方向に、負電荷は電界と反対の方向に変位する。この状態を、原子または分子が分極したといい、誘電体の表面には、電極と反対符号の電荷が現れる。この状態は、誘電体が分極したともいわれ、その電荷を分極電荷という。また、大きさは誘電体中の電界 E に垂直な単位面積を通過する電荷量と等しく、電界と同じ方向を持つベクトル P を分極という。これは、誘電体を挿入したときの極板間の電界 E を、真空中の極板間の電界 E_0 から引いた値に真空の誘電率をかけたものと等しく、次式であらわされる。

$$\begin{aligned}
 P &= \varepsilon_0 \cdot E' \\
 &= \varepsilon_0 \left(\frac{q}{\varepsilon_0} - \frac{q}{\varepsilon} \right) \\
 &= \varepsilon_0 \left(\frac{q}{\varepsilon_0} - \frac{q}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r} \right) = q \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_r} \right)
 \end{aligned}$$

上式より、誘電率を測定することで、物質の分極の大きさを知ることができる。

2.2.5 文献熟読能力について

論文などを根気よく読み勤める能力が、

【問題】以下に示す文献を熟読し、学んだこと(要旨)をまとめてみよ。

別紙の「Oyo-Buturi International」

【答え】このインタビューは、“Musya Tosimitu 博士(以下博士)がどのような経緯で 1/f fluctuations(ゆらぎ)を研究するようになったか”ということを中心にして進められている。具体的にその内容を紹介すると、以下に示すように要約することができる。

博士は、1954 年に東京大学を卒業。その後、電電公社(現在の NTT)の研究所に就職する。そこで、「真空管内の気体放電におけるネガティブ抵抗」と「プラズマ気体中の電磁波の動き」という 2 つのテーマを研究した。

しかし、会社の基礎研究に対する姿勢に絶望し、1964 年 8 月には MIT に転職する。そこで、彼の研究対象がプラズマ気体からプラズマ半導体へ変わった。

その後、1965 年の 1 年間スウェーデンに留学し、さらに、東京工業大学への誘いを受諾し、1966 年の 8 月に日本に帰国する。また、同年の 11 月には TTT への採用が決まり、そこで研究を続けることになる。

TTT での研究は電電公社でしたものと同様なテーマであった。そして、1/f noise のゆらぎの根源を発見することを研究しようと決意した。さらに、学際的な会議を催すことを提案し、1977 年に第 1 回目の 1/f fluctuations に関する学際的な会議が開催された。そして、個人的には人の居住空間で 1/f fluctuations を発見する研究を行い、カタツムリのニューロン細胞の脈拍や音楽におけるゆらぎを観測し、確認した。視覚的にも、日本の木造建築も含めた建造物における 1/f fluctuations を発見した。また、ヘリコプターへの応用も提案した。このように、現在までの 25 年間で費やして、1/f fluctuations の根源を探求してきているのである。

また、最後のほうには、現在の社会問題に触れ、「青少年の理科系離れの傾向について」や「20 世紀と 21 世紀の科学技術の役割」、「クローン技術」、「研究者における社交性の重要性」について述べている。

最後に、1/f fluctuations の偏在性について最終的な結論に至ることができる！！という考えを示しながら、将来構想などを語っている。

2.2.6 論理的思考能力について

or 常日頃、事物に関する現象の把握を、科学的な思考に基づいて行うことはない。大体は、直感的に考えたり、感じたりする。しかし、時折、意識して考えることはある。

また、様々な現象に潜む論理性を追求し、そこで何が起きているのかを多角的に検証してみたいと思う。しかし、次

に何が起るか、何を行えばその原因がわかるかなどは、結構な割合で直感的に考える。それを論理的に考えようとする
と、面倒くさく感じる。しかし、本当に分からないものに対しては、努力を惜しまずに追求したくなる。

2.2.7 実験内容を研究報告の形でまとめる能力について

学生実験を通じて、実験レポートをまとめるにあたり、常に気をつけてきたことを書け、なければ無しと書くこと。

- 横書きなので、句読点を「，」と「。」で書くこと。
- 図の題名は図の下に、表の題名は表の上に書くこと。
- グラフは A4 の用紙に一杯に描くこと。ただし、文章が上綴じなので、グラフを書いた用紙はそれに合わせて右側を綴じること。
- 文章を書くときに、特に考察などは、自分の感想などが入らないようにすること。

技術系の日本語の文章を書く場合に、必要なことは何か、必要なだけ項目を挙げて説明せよ。

- 主観を入れず、常に事実に基づいた意見・結論を述べる必要がある。
- 日本語は、結論を最後に書くという文法上の特徴がある。しかし、技術系の文章を書く場合には、極力結論を先に述べる必要がある。これは、論理的な文章を組立てるときに役立つからである。
- 回りくどい言い方をするのではなく、はっきりと言い切る姿勢が必要である。とかく日本語は、日本の文化背景からして、回りくどい言い方が多いので、その点に注意するべきである。
- 文章の中の区切り記号についても注意するべきである。技術系の文章は、たいてい横書きなので、「，」と「。」、もしくは「，」と「。」にするべきである。

自分には、まとめたり他者に分かるように説明する能力が備わっているか、自己分析をせよ。

多少は培われてきていると感じている。とくに、専門点のプレゼンテーションをやったときに確認できたと思う。あのときは、多少自己満足であったかもしれないが、分かってくれている方もいたことは事実なので、これが裏づけとなると思う、研究発表を Public な形で行う場合に注意しなければならないと思う項目を必要なだけ挙げて説明せよ。

- まず、必要以上に敬語表現などを使うことを避けること。これは、研究発表の場であるので、いくら聴衆が目上の方々ばかりであったとしても、一研究者として同じ立場にいるので、堂々と発表するべきだからである。
- 原稿を読むのではなく、話すことが重要である。公の場であるので、聞く相手のことを思って発表するべきである。
- 歯切れよく、明快に発表するべきである。そのとき必要なものは、事実を明確に述べることと自分の考えをはっきりと主張することである。
- 発表のときには、ある程度テクニックも必要である。例えば、注意を惹きたいときに間を取る。また、注意を惹くためにわざと声を小さくすることなどである。

2.2.8 自己管理、スケジュール管理について

今まで、自己管理、スケジュール管理について各自が実践してきたことを述べよ。特に実践してきたことがない場合には、何故行ってこなかったのかを説明せよ。

今まで、スケジュール管理で実践してきたことは、テスト勉強のスケジュール管理、曜日別の一日のスケジュール管理などである。

また、自己管理としては、体を動かす(陸上の長距離: 中学 1 年 高専 2 年)ことで、精神力の向上と体力の向上をさせ

ること。また、ある哲学・思想を学ぶことで、精神的成長をさせていることなどである。

自己管理、スケジュール管理について、諸君がベストと思われること、方法を提案せよ(実際に実践できることを書くこと)。

まず、先人の哲学・思想を学び、自分の人生観について考える。そして、確固とした観を持つことが必要である。しかし、それがどのような哲学・思想であるかによって、その人の人生は大きく変わってくるので、慎重に見極めていくべきである(私はまだ模索中である)。

観を持つことができたなら、それに従って生きればいい。変わらない自分の観を中心として、自己管理、スケジュール管理などをすればいいと思う。細かいテクニックは、いろいろな本に載っていると思うので、それを参考にすれば、よりよいスケジュール管理などができると思う。

ただ、自己管理、スケジュール管理などをするときの基準をどこに置くかは、その人ごとに違ってくる。これが観だと思う。だから、自分が物を見るとき基準を定めることが第一であると思う。

2.2.9 卒業研究に取り組むにあたり、卒業研究従事時間を明確にしたい。諸君が、どの程度の覚悟を持って、卒研に当たるか述べよ。

毎日 16:00 20:00 頃までの 4 時間で、月曜日から金曜日の 5 日間で $4 \times 5 = 20$ 時間、20 時間 $\times$ 4 週間 = 80 時間、80 時間 $\times$ 10 ヶ月 = 800 時間、ただし、土日は入れていないし、長期休みの時間は入れていない。諸君は、この位の実施時間は、当然達成する自信はあるか？よく熟考した上で答えよ。

() 4 月 7 月半までの期間(95 日間[平日:66, 休日:29])

編入学試験へ向けての勉強を重視するため、最高でも、平日で一週間(5 日)に 1 回 4 時間取れるくらいである。これに、授業時間を加えて、一週間(5 日)で $4 + 4.5 = 8.5$ [h]。従って、合計は

$$8.5h \times (66 / 5) \text{ 日} = 8.5 \times 13 = 110.5[h] \dots (A)$$

もし、授業時間を含めないで、卒業研究従事時間とするならば

$$4h \times (66 / 5) \text{ 日} = 4 \times 13 = 52[h] \dots (B)$$

() 夏休み期間(49 日間)

ここでも、編入学試験へ向けての追い込みを重要視するため、最高でも、一週間(7 日)に 1 日(午前:3h, 午後:5h)取れるくらいである。従って、合計は

$$8h \times (49 / 7) \text{ 日} = 8 \times 7 = 56[h] \dots (C)$$

() 9 月 12 月までの期間(112 日間[平日:77, 休日:35])

この期間からは、本格的に卒業研究に取り組める期間となるので、平日で毎日 4 時間、休日で 2 日に 1 日(午前:3h, 午後:5h, 夜:2h)はやるとする。これに、授業時間を加えると、一週間(7 日)で

$$4 \times 5 + 10 \times 1 + 9 = 39[h]$$

従って、この期間の合計は

$$39h \times (112 / 7) \text{ 日} = 624[h] \dots (D)$$

もし、授業時間を含めないとするならば

$$30h \times (112 / 7) \text{ 日} = 480[h] \dots (E)$$

() 冬休み期間(24 日間 - 4 日間[正月など])

この期間は、卒業研究も佳境に入ってくる期間であると思われる。従って、毎日(午前:3h, 午後:5h)取組むとすれば、その合計は

$$8h \times 20 \text{ 日} = 160[h] \dots (F)$$

() 1 月, 2 月の期間(45 日間[平日:32, 休日:13])

この期間は、卒業研究のまとめの段階であると思われる。従って、平日で毎日 4 時間、休日も毎日(午前:3h, 午後:5h, 夜:2h)取組むとする。これに、授業時間を加えると、一週間(7 日)で

$$4 \times 5 + 10 \times 2 + 9 = 49[h]$$

従って、この期間の合計は

$$49h \times (45 / 7) = 294[h] \dots (G)$$

もし、授業時間を含めないとするならば

$$40h \times (45 / 7) = 240[h] \dots (H)$$

以上から、授業時間を含めた卒業研究従事時間は

$$(A) + (C) + (D) + (F) + (G) = 1244.5[h]$$

また、授業時間を含めない卒業研究従事時間は

$$(B) + (C) + (E) + (F) + (H) = 988[h]$$

となる。以上の結果をそのまま反映させることは無理である(今の生活でさえ非常に忙しいから)。そこで、算出した結果の80%しか達成できなかったとする。それでも、授業時間を含めない卒業研究従事時間は

$$988 \times 0.80 = 790.4[h]$$

となり、800[h]に極めて近い。

上述より、理論上は前期の大半を編入学試験対策の時間に割り当てたとしても、後期で挽回できるので、800 時間というオーダーに極めて接近することができる。

しかし、現実的には、設定したスケジュールをその通りに達成するということは非常に難しい。また、時間が全てではないので、それを目標にすると、ちょっと本質をはずれてしまうと思う。

以上を踏まえて最終的な結論を述べると、卒業研究従事時間 800 時間を当然のごとく達成する自信はない。しかし、それに近いところまでは自然にいくと思う。なぜなら、卒業研究に対しても真剣に取り組むことが期待できるから(来年の自分自身に対して)である。

2.2.10 現在、自分が他人と比べても誇れる(得意とする)能力は何か説明せよ。

一つのことに集中して取り組むことができる能力。これは、自分の得意不得意分野に左右されることなく、興味のある無しにかかわらず、使命感と責任感を持ってやることができる。それが自分の得意分野であり、興味のあるものならばなおさらである。

2.2.11 卒業研究を行うにあたり、藤田研で行っている研究に関して、どのような形で参加したいか、詳しく述べよ。

この学生の時には多くの経験と様々な内容を学んでおくことが重要だと考えるので、何をやっても意味のないことはないと思う。

ただ、私は物性を学ぶために、この研究室を選んだので、物性についてより多く学ぶことができる研究ならばいいと思っている。

2.2.12 自分が卒研を取組むにあたって、自己 PR できる点(能力)をアピールし、やってみたいテーマを挙げてみよ。テーマに関しては、現在挙げてあるテーマに囚われなくてもよい。ただし、挙げていないテーマに関しては、研究計画書を作成せよ(研究計画書も書けないのに、テーマを挙げる資格はない)。

自己 PR できる点は、とにかく一つのこと集中して取組むことができる点である。

そこで、研究テーマを見てみると、まず、測定機器の製作や誘電率の測定というテーマは、失礼だがあまり興味がない。なぜなら、測定機器や測定することというのは誘電体を評価するための道具や手段であり、目標がすでに見えているからである。言い換えれば、数学の答えを知っていて、解答をその答えに持っていこうとしていることと同じなのである。

したがって、今やってみたいテーマは「高温電気炉を用いた強誘電体単結晶の育成及び単結晶評価」である。

ただ、このテーマは非常に大きいテーマである。育成をするだけでも 1 年でできるかどうかだし、評価するのに、多くの知識が必要だと聞いている。したがって、まず評価することができるように知識を蓄えて、それから育成のできる環境(装置など)を整え、育成をして、結果として育成された強誘電体単結晶を評価するという過程を経るのが私は妥当だと思う。

私が臼井研でなく、藤田研を選んだ一つの理由として、評価するだけでなく、実際に作る(育成する)ことができるからというものがあったので、ぜひ、そこまで進めることができるといいと思う。

3. 論文の基本

以下に、論文を作成する際の基本的な事柄が書かれている『理科系の作文技術』の要約したものを示す。

元英国首相ウィストン・チャーチルの要求する報告書の形態は以下のようなものである。

- () 報告書は、要点をそれぞれ短い、歯切れのいいパラグラフにまとめて書け。
- () 複雑な要因を分析した結果に基づく報告や、統計に基づく報告では、要因の分析や統計は付録とせよ。
- () 正式の報告書でなく見出しだけを並べたメモを用意し、必要に応じて口頭で補ったほうが多い場合が多い。
- () 次のような言い方はやめよう：「次の諸点を心に留めておくことも重要である」、「...を実行する可能性も考慮すべきである」。この種のもってまわった言いまわしは埋草に過ぎない。省くか、一語で言いきれ。

すなわち、簡潔な報告書ということである。

さて、この書物の目標は、理科系の若い研究者・技術者と学生諸君が仕事や勉学でものを書くときに、役立つような表現技術のテキストを提供することである。ここでいう仕事で書く書物とは、他人に呼んでもらうことを目的とするものであり、用件の手紙やメモの類からレポート、原著論文、使用の手引き、構造説明書などを指す。以下、これらを一括して理科系の仕事の文書と呼ぶことにする。

理科系の仕事の文書の特徴は、読者に伝えるべき内容が事実(状況を含む)と意見(判断、予測を含む)にかぎられていて、感情的要素を含まないことである。

私の考えでは、このような性格を持った理科系の仕事の文書を書くときの心得は、主題について述べるべき事実と意見を十分に精選し、それらを、事実と意見とに峻別しながら、順序よく、明快・簡潔に記述することである。以下に、上述の内容を詳細に説明する。

まず、内容の精選とは、必要なことは洩れなく記述し、必要でないことは一つも書かないということである。これは仕事の文書を書くときの第一原則である。また、事実と意見を区別して書くことは、論理の組立てにおいて非常に重要である。これを誤れば、意見と事実のすり替えが行われ、不当な結論が導き出されてしまう可能性がある。次に、記述の順序に関してであるが、これは二つの面からの要求がある。一つは、文章全体が論理的な順序に従っていないといけないということであり、もう一つは、読者の期待に沿える順序であるか、ということに対する配慮である。最後に、明快・簡潔な文章というのは、冒頭で紹介したチャーチルの要求するものと等しく(a)一文の表現が一義的に読めるものであること、(b)ははっきり言えることは言い切り、あいまいな表現を避けること、(c)できるだけ日常用語を用い、なるべく短い文で文章を構成することである。

また、理科系の文章表現のもう一つの特徴として、「やわらかさ」が無視されていることをあげておく。この理由は、理科系の文書が「やわらかさ」を顧慮するために「あいまいさ」が導入されることを嫌うからである。

さて、この書物の主な内容は理科系の仕事の文書を書くときの文書技術である。これは、作文技術といってもいいが、それは米国の大学の English-composition、または rhetoric の講座で教えられているもの、すなわち、情報と意見を国語で正確に、有効に記述する方法論に近い。

序章を閉じる前に、参考書を紹介しておきたい。現代レトリックの簡にして要を得たテキストとしては、コーベットの『リトル・レトリック』を、もっと English-composition の性格の強いものとしては、エビットの本とゴレルとレアドの本をあげる。科学者、技術者向けのものとしては、パラスの小冊子、ピケットとラスターの本、モスの本がおもしろい。

私が上記に紹介した本を通観して意外に思ったのは、「主題を選ぶ方法」、「言うべきことを見つける方法」、「見つけたことを選択し、配列する方法」という類の話題に少なからぬページを費やしていることである。これは、一般的な課題について論説を展開しようとするときに、必要となるからである。

しかし、理科系の仕事の文書では、主張が先にあってそれを裏付けるために材料を探すなどということとはありえない。書く作業は、主要構成材料が手許にそろってから始まるのである。では、理科系の仕事の文書を書く場合に、「主題の選定」、「材料の探索」などの心得が不要であるかといえば、そうではない。理科系の仕事の文書に関しても、これらの準備作業は必要なのである。

仕事の文書にはそれぞれの役割があり、機能がある。したがって、準備作業に入る第一の前提として、自分の書こうとする文書の役割を確認することが必要である。これは、理科系の仕事の文書の大部分が、必要上やむを得ず書くもの、または誰かに書かされるものであることに起因する。つまり、その文章を書かせようとしている人が何を書かせたいのか、知りたいのかをとことんまで調べ上げ、考えぬくのが先決問題なのである。

仕事の文書では、主題がその文章を書く人の意思、または書かせようとしている人の意向によって確定している場合もある。この場合には、主題はそれらによって決まってしまう。では、一般的な課題が与えられた場合の主題選定と、その主題のなかでどんな材料を取り上げるかを決める上で、考慮すべきポイントは何だろうか。以下に、私の念頭に浮かぶものをあげる。

まず、一つの文章は一つの主題に集中するべきである。なぜなら、一つの文章にいくつもの主題が混入すると、読者に与える印象が散漫になり、文章の説得力が低下するからである。また、一方の主題を指標として分類ファイルされたら最後、その文章のなかの他の主題に関する記述は、たぶん永久に陽の目を見ないからである。

また、文章の長さ制限によって主題の選定が制約されることがある。せまいスペースに無理に多くのことを書こうとしても有効な議論はできない。説得力のある、密度の高い議論を展開するためには、長さに応じて主題をしばらなければならない。

さらに、主題の選定、あるいはその主題に関して取り上げるべき材料の取捨にあたっては、読者が誰であり、その読者はどれくらいの予備知識を持っているか、またその文章に何を期待し、要求するだろうかを、十分に考慮しなければならない。

そして、できるかぎり自分自身が直接ことに当たりものに当たって得た情報-なまの情報-、またそれについての自分自身の考えに重点を置くべきである。これらは、たとえ不備であり未熟・浅薄であったとしても、オリジナリティーという無比の強みをもっているからである。

主題をはっきり決めたら、次に自分は何を目標としてその文章を書くのか、そこで何を主張しようとするのかを熟考して、それを一つの文にまとめて書いてみることを勧める。そういう文を目標規定文ということにする。私は、少なくとも初心者にとってはまず目標規定文を書き、それからその目標に収束するように文章全体の構想を練ることが必要だと考える。目標規定文は、執筆の途中で材料の取捨選択に迷ったときにも判断を助けてくれるだろう。ただ、最初に書く目標規定文は、書き改める可能性のあるもの、筋の通った文章を書くための一応の目標と考えておくべきである。

最後に、(a)必要なことを書きおとす危険をへらし、(b)また補助材料を利用して表現を豊かにし、説得力を増すのに役立つ材料の探索法の心得を以下に述べる。

まず、思いつくままのメモを取ることを勧める。このやり方に似たものにはブレンストーミングや、デ・ボーンの横っ飛び式思考法などがある。そして、これらのメモを利用して文章を組立てていく技術として、川喜多二郎氏の KJ 法も一度は試みてみるべきだろう。

次に、書くべきポイントを示し、また考えるべき事項を示唆する“定石”として、5W+H や、それが「どんなものか」を記述するときには、まずそれに似たものを探し、次に似たものとそれとはどこが違うかを考えること、問題を論じるときにはまず、何が問題なのか、それについて確実にわかっている点はどんな点か、よくわかっていなくて調べる必要があるのはどんな点かを明らかにすることなどがある。さらに、図・表を準備すること、文献探索などが材料集めの手法としてあげられる。

さて、文章の構成法には、様々なものがある。その一つに、古来よりうけつがれてきた起承転結の組立て方がある。しかし、世の中が忙しくなるにつれて、そのような論文の末尾に重心が集中しているものから、重心が前のほうに移っていくようになった。それが、新聞記事のような重点先行主義の組立て方である。ただ、論文では、研究の結果を 2 度繰り返して書くことになるので、結論あるいはまとめの内容が＜著者抄録＞として論文の冒頭、表題や著者名などのすぐ次に印刷されるようになってきている。そして、もっとも簡潔なものとして、序論・本論・結びという組立て方もある。

以下では、単純な文章の場合を考えて、文章を序論、本論、結びの三部からなるものとみなして、序論と結びについての考察と、本論の組立て方についてのメモをしるす、

序論、序言、はしがき、introduction とよばれるものの使命は、読者を本論にさそいこむ、読者が抵抗なく本論に入っていけるように準備をととのえることにある。しかし、理科系の仕事の文書の読者には職業意識があり、読者が序論によってその文章を読んだり、読まなかったりすることはない。したがって、理科系の文章の序論に必要なのは、(a)読者が本論を読むべきか否かを迅速・的確に判断するための材料を示し、(b)また本論にかかる前に必要な予備知識を読者に提供することである。

(b)の内容としてとくに要求されるのは、()本論の主題となる問題は何か、()その問題を何故取り上げたか、()その問題がなぜ重要か、()問題の背景はどんなものか、()どういう手段によってその問題を攻めようとするのか、という解説だろう。また、具体的な情報を提供してその重要性などの判断は読者にゆだねる態度が望ましい。つまり、序論は重点先行主義の方式を取るのではないが、みじかくすることを心がけて書くべきなのである。

結びは、伝統的には(a)本論の主なポイントを簡明に列挙してまとめ、(b)それらの重要性を強調し、また将来の発展への道を示唆するものとされていた。しかし、現代的重点先行主義、情報過多時代の要請や客観主義によって、よほど長い論文は別として＜結び＞という節は、姿を消してしまい＜議論＞で終わるのがふつうのかたちになった。上記の(b)の要素は＜議論＞の中に生き残っているが、(b)の前半は客観的な関係の指摘だけというかたちに変貌してきている。

本論については、その叙述の順序について以下に述べる。

まず、記述文、説明文の書き方からはじめる。前に、文章全体の構成に関しては重点先行主義を強調した。説明文を書く場合にもこれに似た方針を勧めたい。それは、そこで書こうとすることについてまず大づかみな説明を与えて読者に概観を示してから、細部の記述に入るというやり方である。

では、細部の記述の順序を決める要素は何か。まず、書くべき中身を機能別に分類したり、性質別に分けたりすること

ができる場合には、その分類にしたがって記述を進めるのが第 1 の原則である。この原則にしたがって分類した各項目のなかでの記述、また、上記の原則による分類ができない場合の記述に関しては、空間的または時間的な配列にしたがって記述順序を考えてみるべきだろう。

これらのほかにも、記述・説明文の記述の順序を決めるにはいろいろの原理があろう。いずれにしても肝心なのは (a) どのような順序で書くかを思い定めてから書き始め、途中でその原則を侵さないこと、(b) どうしても原則を守れなくなったら、いさぎよく方針を立て直して最初から書きなおすことである。

理科系の仕事の文書で、情報の伝達を目的とする記述・説明文と並んで主役をつとめるのは、論理を展開する文章である。これは、理論の叙述と説得を目的とする叙述とに大別できよう。

理論と呼ぶにふさわしい理論を述べる文章では、内容によって記述の順序が決まってしまうので、文章論としてはほとんど議論の余地がない。しかし、論文は読者に読んでもらうものだから、結論にたどり着く道筋はもっとも簡明な道にそって書かなければならない。また、理論の基礎にある仮定を浮き立たせて書くことにも配慮してほしい。

説得を目的とする議論の文章の場合には、いま述べた純粋理論の叙述にはない恣意性がある。それだけ叙述の順序の自由度が増し、順序の選び方によって説得の効果が違うことにもなる。それは相手により、機に応じて選択するほかない。

次に、文章の具体的な構成案の作り方についての解説を試みる。

文章の価値を決めるのが第 1 に内容であることは言うまでもない。しかし、内容にどんなに優れたものがあっても、文章がとにかくちゃんと書いていなければ、他人に読んでもらえない。その意味で文章の死命を制するのは、文章の構成なのである。文のうまさ(語句の選び方、口調のよさ)などは、理科系の仕事の文書の読者にとってはそれほど重要でないのである。

さて、具体的に構成案をつくる方法は、人により向き不向きがあって一概には言いがたい。初心者はずまず以下に紹介する三つの方法を試み、自分に合うようにだんだんにやり方を修正していくべきだろう。

一つ目は、構成表をつくるやり方である。これは、ある組立てを前提として、さまざまな項目を構成要素として構成表を書いていくというものである。このときの要点は、(a) < 思いつくままのメモ > などを利用して、必要な項目を落とさないようにすること、(b) 構成表の同じ段階のところには、ほぼ同じ格のものが並ぶようにすることの二つである。そして、構成表を書きながら、記述の面で関連させなければならないものにしるしをつけ、その関連を考えながら、どのような順序に項目を配列すれば話が往きつ戻りつするのを避けられるかを考える。最後に、できあがった表の上で、各節をさらに小節に分けるべきか否かを検討し、また各節の paragraph 構成を考えるのである。

二つ目は、一つ一つの paragraph に書きこむべき内容を、みじかい文または句にまとめてカードに書きこみ、どのような順序に並べればもっとも明快な叙述になるかを検討するというものである。これも、先程と同様で、全体の構成におよその見当がついている場合のやり方といえる。これが慣れてくれば、カードを書くことなく、メモをにらみながら頭のなかで駒の並べかえを繰り返して、いい形が出てくるのを待つこともできるようになる。

三つ目は、内容が複雑で、どのような形にまとめればいいのか見当がつかない場合の構成案の作り方を紹介する。まず、全ての資料に通しページ番号を打ち、拾い上げるべき項目ごとにカードを作り、各カードにその項目が出てくるページ番号を入れる。次に、将来一つの small section にまとまるだろうと思われる group ごとにゴム輪でまとめ、small section 見出しを書いたカ

ードをつける。この小節グループを節グループにまとめ、さらにこれらをまとめて一つの章に入れるべき内容を集積するのである。それから、目次案を書き下ろし、この目次案の順にカードの束をほぐして読んでいく。このとき、修正点が見つかるので、そこを修正して最終目次案を仕上げるのである。

ところで、文章をどこで切ってパラグラフとすべきか、パラグラフの構成はどんな条件を満たすべきかということがしばしば問題になる。

パラグラフというのは、長い文章のなかの一区切りであって、原稿を書くときにはパラグラフが変わるごとに1字下げて書き始めることは誰でも知っている。しかし、「パラグラフに含まれるいくつかの文はある条件を満たしていなければならない」ということを意識している人は少ないようだ。

パラグラフは、内容的に連結されたいくつかの文の集まりで、全体として、ある一つのトピック(小主題)についてある一つのこと(考え)を言うものである。パラグラフのなかにはそこで何について何を言おうとするのかを一口に、概論的に述べた文が含まれるのが通例である。これをトピック・センテンスという。パラグラフに含まれるその他の文は、(a)トピック・センテンスで要約して述べたことを具体的に、詳しく説明するもの(展開部の文)か、あるいは(b)そのパラグラフと他のパラグラフとのつながりを示すものでなければならない。この意味で、トピック・センテンスはパラグラフを支配し、他の文はトピック・センテンスを支援しなければならない。

トピック・センテンスは、パラグラフの最初を書くのがたてまえである。だが、現実の文章はそうなっているとはかぎらない。しかし、私はこと仕事の文章に関するかぎり、重点先行主義にしたがってトピック・センテンスを最初に書くことを原則とすべきだと考える。それでも、この原則を忠実に守りぬくことは難しい。その理由は、(a)先行するパラグラフとのくつなぎの文を、トピック・センテンスより前に書かなければならない場合があること。(b)トピック・センテンスを第一文とするパラグラフばかりが続くと、文章が単調になるきらいがあること。(c)日本語の文の組立てがこれに向かないことである。

ときには、トピック・センテンスが省かれる場合もないではない。しかし、理科系の仕事の文書を書く初心の執筆者は、各パラグラフに必ずトピック・センテンスを書くように心がける方がいい。文章を書きながら絶えず読み返して、各パラグラフにトピック・センテンスがあるか、展開部の文はトピック・センテンスとちゃんと結びついているか——と点検する習慣をつけることを勧める。

展開部、すなわちパラグラフのなかでトピック・センテンスの内容について具体的な詳細を述べる部分を書く際には、文を並べる順序やつなぎのことばをよく考えて、一つ一つの文とトピック・センテンスとの関係、および次々の文のあいだの関係を明瞭に示す必要がある。

ここまでは、一つのパラグラフの内部構造に話題をしばってきた。今度は見方を変えて、一つの文章はどのような風にパラグラフに分割すべきか、パラグラフ間の連関はどうあるべきかを考えよう。

パラグラフは、あるトピックについてある一つのことを言うものであるが、そのトピックは大きくも小さくも取ることができる。したがって、そのトピックの取り方によって、長いパラグラフを書くこともできるし、短いパラグラフを書くこともできるのである。

しかし、原則としては文章自体が非常に短い場合にはパラグラフに分割する必要はない。これは、原著論文の表題の下に印刷される著者抄録などにいえる。また、もっと長い文章では、当然、主題をいくつかの小主題に分割して、各トピッ

クにそれぞれ一つのパラグラフを割り当てることになる。前に「文章の構成案の作り方」で扱ったのは、つまりこういうトピックの立て方の問題であったのである。

このトピックの立て方は、パラグラフの長さや密度と密接に関係している。短すぎるパラグラフは、散漫な印象を与えるし、長すぎるパラグラフは、読者に読む気を失わせる。また、パラグラフの長さを選ぶに当たっては、文章の性格も考えに入れる必要があるのだ。

また、パラグラフの連結については、パラグラフの頭につなぎのことが書いてなくても、冒頭のトピック・センテンスを読めば、これから書かれることと今までに書いてあったこととの関連が自然にわかるのが本来である。しかし、冒頭にトピックセンテンスがない場合には、パラグラフの最初に、先行するパラグラフとの関係を示す文または句を入れることを忘れてはいけない。

私は、理論物理学者のレゲットの「科学英語の書き方についてのノート——日本物理学者のために」というエッセイ(英文)をいつも、英語で科学論文を書こうとする若い人たちが読むべき文献の第一にあげる。レゲットはそのなかで、<巨視的>な問題からはじめて<微視的>な問題におよぶ順で筆を進めている。彼のいう微視的な問題は、多く英語に固有なものだが、巨視的な論点には、日本語で論文を書く人にとっても傾聴に値することが多い。

巨視的な論点の一つとして、日本人の文章の組立て方について彼は次のようにいう。(a)日本語では、いくつかのことを書き並べるとき、その内容や相互の連関がパラグラフ全体を読んだ後ではじめてわかるような書き方をすることが許されているらしいが、英語ではこれは許されない。これを逆茂木型の文章と呼ぶことにする。(b)また、少々くどいと思っても論理の鎖の環をはぶいてはいけない。

私は、日本語の文では、(a)の要求を完全に満たすことには多少の無理があるし、(b)に忠実に従うと在来の日本語の文章のゆかしさをそこなう場合があると思う。しかし、理科系の仕事の文書では、(a)、(b)の要請をみたすように書くべきものと私は信じるのである。

日本語では、修飾句・修飾節は必ず前置されるために私たちは逆茂木型の文を書くことが多い。しかし、そのつもりで努力しさえすれば退治できるのである。文章の流れが逆茂木型にならないために何よりも必要なものは、話の論理に対する研ぎ澄まされた感覚である。もっとも、感覚だけ鋭くても、何度でも書きなおして完全を追及する執念がなければものにならないことは言うまでもない。

レゲットはさらに次のように述べている。(c)英語の文章は、明確に書くこと、あいまいな点を残さずに書くことが何より大切だ。(d)日本人は、はっきりしすぎた言い方、断定的な言い方を避けようとする傾向が非常に強い。ところがこれは、欧米の読者の大部分にとっては、思いもつかぬ考え方なのである。だから、いくら不自然に思えても、できるかぎり明確な、断定的な言い方をしたほうがいい。

レゲットが述べる日本語と英語の違いは、単に修辞法の差から生まれてくる違いではない。大上段のいい方をすれば、日本と西欧との文化の差に根ざす深い溝なのである。私は、心情的には「他の可能性もあるのに、それを斟酌せずに自分の考えを断定的に述べる」ことに強い抵抗感を感じるが、理性的な判断として、日本人は平均として自分の考えをもっと明確に言いきらなければならぬと考える。

理科系の仕事の文書は、がんらい心情的要素を含まず、政治的考慮とも無縁でもっぱら明快を旨とすべきものである。そこでは記述はあくまで正確であり、意見はできるかぎり明確かつ具体的であらねばならぬ。理科系の仕事の文書に関

するかぎり、敢えて日本語でない日本語、明確な日本語を使うことにしようではないか。

レゲットの話題を中心にここまで書いてきたものは、もっぱらものを書き、または言うときの姿勢についての議論であって、具体的・文章技術的な裏打ちがかけられている。これは、この問題に関するかぎり、必要なのは基本的な姿勢を確立することであって、はっきり言いきるために特別な表現技術の勉強がいるわけではないからである。

とはいうものの、文章技術の上で心得ておくべきことが全くないわけではない。私たちは、無意識のうちにぼかしことばを乱用する習癖をもっている。仕事の文書のなかでは、それらの類をできるだけ削ることも大切な心得の一つである。また、ぼかしことばを入れたくなるたびにそれが本当に必要なかどうかを吟味する習慣を確立すると、文章はずっと明確になる。そして、「仕事の文書で何事かを書くのはステートすることだ」というステートメントをよくかみしめ、念頭にとどめておくことを読者に勧めたい。ステートするときには当然、一句一句に責任が伴うのである。

さて、文章を書く際に（ ）事実と意見をきちんと書きわけろ。（ ）仕事の文書では、事実の裏打ちのない意見の記述は避けるという2つの心得が必要となるが、その前提となるのは事実と意見とを峻別する鋭い感覚である。

ここでは、(a)自然に起こる事象や自然法則；過去に起こった、人間の関与した事件などの記述で、(b)然るべきテストや調査によって真偽を客観的に確認できるものを事実の記述と定義しておこう。また、中間的な結論を推論といい、ものごとのあり方、内容、価値などを見極めてまとめた考えを判断といい、これらの意味での推論や判断；あるいは一般に自分なりに考え、あるいは感じて到達した結論の総称を意見ということにする。さすれば一般的に、事実の記述は二価（真か偽）であるが、意見の記述に対する評価は原則として多価であるといえる。

では、事実と意見を記述する際に必要な注意点は何か。まず、事実の記述だけを取り出して考えれば次の三つに尽きる。

- (a) その事実に関してその文書のなかで書く必要があるのはなんなのかを十分に吟味せよ。
- (b) それを、ぼかした表現に逃げずに、できるだけ明確に書け。
- (c) 事実を記述する文はできるだけ名詞と動詞で書き、主観に依存する修飾語を混入させるな。

また、意見の記述における注意点は以下の通りである。

- (d) 意見の内容の核となることばが主観に依存する修飾語である場合には、基本形の頭と足を省くことが許される。
- (e) そうでない場合には頭と足を省いてはいけない。

日本語の特性として、主格が私であることが明らかな場合には(e)で頭を省くことが許される。しかし、理科系の仕事の文書ではこれらの表現はできるだけ避け、意見の内容は断定形で書いて、頭と足を明記するべきである。

理科系の仕事の文書を書くときには、事実と意見との区別が格別に重要である。そのときの心得として、(a)事実を書いているのか、意見を書いているのかをいつも意識して、両者を明らかに区別して書く。書いたあとで、逆に取られる心配はないかと入念に読み返す。(b)事実の記述には意見を混入させないようにすることがあげられる。

理科系の仕事の文書に書きこむ意見は、事実の上に立って論理的に導き出した意見でなければならない。さらに、その意見を根拠のある意見として読者に受け入れさせるためには、意見の基礎になる全ての事実を正確に記述し、それにもとづいてきちんと論理を展開することが必要である。しかし、理論物理の論文は別にして、ふつう、事実から意見を構成する段階の論理は割合に単純なものである。したがって、しばしば、自分の意見の根拠になっている事実だけを具体的に、正確に記述し、あとは読者自身の考察に任せるのがいちばん強い主張法になるのである。

このとき、事実の記述は、一般的でなく特定の程度、また漠然とした記述ではなくはっきりとしているほど、抽象的でなく具体的であるほど、情報としての価値が高い。また読者に訴える力が強いといえる。

これまでに書いてきたのは、大体において、理科系の仕事の文書の文章を組立てるための巨視的な心得であったが、これから取り上げるのは微視的な問題である。

まず、仕事の文章の文は、短く、短くと心がけて書くべきである。このことの本質は、文を頭から順々に読み下してそのまま理解できるかどうかであって、「長さ」にはこだわらなくていい。

ところで、長い文を書いてしまうときは、大抵書くべきことが頭のなかにびっしり詰まっていたり、それらが一気にほとばしり出るときによくあることである。内圧の高い状態はきわめて望ましいのだが、それを外に押出して文章にうつすときには、流れを冷静にコントロールする必要があるのだ。このときに心がけることとして、以下の三つをあげておく。

(a) まず、書きたいことを一つ一つみじかい文にまとめる。(b) 次に、それらを論理的にきちっとつないでいく。言いかえれば、短い独立した文の相互関係がわかるように並べる。(c) 以上の過程を通じて、いつでも「その文のなかでは何が主語か」をはっきり意識して書くことである。これらを考慮して、書きなおしたとき文章の一種の迫力が不足するかもしれないが、しかし理科系の仕事の文書は、心情的要素を犠牲にしても明快・簡潔を旨とすべきものなのである。

また、明確であるべき仕事の文書の文章では、格の正しい文を書くようにとくに気を配る必要がある。もっとも、＜足なしの文＞が全て破格というわけではない。ただ、明確な文章を書くためには、文の途中で頭がすげかえられていたり、あるべきことばが抜けていたりするときに、すぐそれに気付く敏感さが必要である。そのためには、おかしいと感じた文章は、必ず読み返してどこがおかしいのかを突き止める習慣をつけるのがいい。

次に、まぎれのない文、つまり一義的にしか読めない文を書くにはどうすればいいのだろうか。

私自身は、一つの文を書くたびに、読者がそれをどういう意味に取るだろうかと、あらゆる可能性を検討することを自分に課している。二通りに取れる場合には、「どちらに取られてもいい」と妥協することも絶無ではないが、まず必ず書き改める。

序章の最初にチャーチルのメモを引用したが、それから40年(現在を2000年とすれば60年)たってもこのメモの必要度は少しも失われていない。ここで、今一度、簡潔な文章について述べることにする。簡潔な文章は、「簡潔」というが、短ければいいというものではない。必要な要素は洩れなく書かなければならないのである。必要ギリギリの要素は何かを洗い出し、それだけを切り詰めた表現で書くのだ。一語一語が欠くべからざる役割を負っていて、一語を削れば必要な情報がそれだけ不足になる——そういうふうを書くのが理科系の仕事の文書の書き方の理想なのである。こういう要求が最も厳しいのは、論文の著者抄録のように長さがきちっと制限されている場合である。そういうときには、記号や式を使ってスペースを節約する心得が役に立つ。

理科系の仕事の文書は内容と論理で勝負すべきもので、文章は、奇をてらわず読みやすいほどいい。読みやすさへの配慮については、これまで述べてきたが、なお付け加えるべき微視的、技術的なことがいくつかある。

まず、字面の白さである。これは、文章をぱっと見たときに全体として白く感じるか、黒く感じるかということである。これは、漢字の含有率に関係している。用のないところに漢字を使うのはあまり読みやすいとはいえないのである。また、理科系の仕事の文書は、中身が充実していて価値の高いものであればあるほど、誰にでもスラリと読めるように書いてもらいたいものである。そういう意味で、かたい漢語やむずかしい漢字は必要最小限しか使わないようにしてほしい。さら

に、日本の科学者の書く日本語はとかく受身の文が目につくが、現在の欧米は責任の所在を明らかにするために、積極的に能動態を奨励していることも考えて、旧式の欧文脈に毒されずに、能動態の素直な日本語で記述してほしい。そして、並列表記法として、併記する文に番号を打つことを勧めたい。

さて、広い意味で文や文章のなかの区切りを示す記号の使い方も文章の読みやすさ、分かりやすさに関係する大切な要素である。そこで、ピリオド、コンマをはじめとする記号をもう一度見直して、より読みやすい文章を書く努力をしてほしい。また、私流儀の書き方として、字面を適当な白さに保つことや、文末の述語が次々と変わっていくように心がけること、書いていることばが書き言葉よりも話し言葉により近くすることなどを紹介しておく。

さて、これから述べることは、実際に紙の上に文字、記号、その他を書き並べる際の心得——技術的なメモ——だが、やや異質的なものとして「辞書」、「読み直しと校正」という内容も入る。以下の記述は、主として印刷のための原稿を書く場合を想定したものである。

最初に、きわめて簡単だが有用な心得として、どの書物であっても最初に必ずその日の日付を入れて書き始めることを勧める。このとき、年を入れることが大切である。

書くことを本業とは心得ない理科系の人たちであっても、自分の書くものを他人に読んでもらおうとするからには、ことばを厳しく吟味し、字を確かめるといった心掛けが必要となる。そのためには、書くときには必ず机上に辞書を置き、書いていることばに疑問を感じたら即座に辞書を開くという習慣をつけるべきである。

次に、単位についてであるが、単位は原則として国際単位系の単位を使うべきである。単位の書き方については次の諸点に注意されたい。

- (1) 単位記号は立体(ロマン)の活字で記す。
- (2) 一般にはぜんぶ小文字にするが、固有名詞に由来する単位の記号は第 1 文字目を大文字とする。ただし、単位名のほうはぜんぶ小文字で書くことに注意。
- (3) 数字と単位記号との間は 1 字分あける。ただし、1 字分あけるのは原稿用紙の上での話で、印刷面では 1/2 角、または 1/4 角あけることにする。
- (4) 単位のあとには、文の最後にくるとき以外は、ピリオドをつけない。
- (5) 組立単位で単位の積を表すには、(a)ただ並べて書く、(b)カケルの符号としてなかぐろを入れる、(c)カケルの符号としてピリオドを入れる、(d)1 字あける、の 4 つのやり方のどれを使ってもよい。ただし、誤解の恐れのない場合は(a)がよい。(b)、(c)、(d)のなかでは(b)がいいとされている。
- (6) 単位の商を表すには、(a)水平の横棒を使う、(b)斜線(/リダス)を使う、(c)負のべき指数を使う、のどれによってもよい。ただ、(b)が最もよく使われ、複雑な組立単位を表すには(c)がよい。
- (7) 単位の商を(6)の(b)の形に書く場合、分母が 2 つ以上の単位を含むときには括弧を使う。

また、量を表す文字記号を完全に統一することはできないが、できるだけ標準的な文字記号を使うべきである。そして、量を表す文字記号が文頭にくることはできるだけ避ける。

理科系の仕事の文書で、他人の報告、データなどを引用するときには、必ずその出所を明示しなければならない。引用文献の示し方は、次の 2 通りに大別できる。すなわち、() 番号方式: その文書に出てくる順に番号をつけ、文書の最後(長い文書では各章末)または各ページの下に、番号順に書誌要素を記す。同じ文献を何回も引用する場合には初出

のときと同じ番号をつける。()ハーヴァード方式:著者名と発表の年をしるし、文書の最後(長い文書では各章末)に第1著者の姓のABC順またはアイウエオ順に各文献の書誌要素を並べる。

上記のどちらの方式によるにしても、一つの引用のなかに2つ以上の文献をあげてはいけない。また、著者が複数の場合、書誌要素としては必ず全員を記載することが要求される。雑誌名は、和文誌では原則として省略せずに正式名称どおりに書く。欧文で和文誌を引用する場合には、誌名をそのままローマ字書きする。その雑誌の正式欧語名が決まっている場合には、必要に応じて、カッコに入れてこれを示す。欧文誌名は、国際規格にしたがって略記する。

他人の導き出した結論の要旨や数式、またデータなどは、公刊されたものであるかぎり、上述の方法で出所を明示しさえすれば自由に引用してよい。しかし、他人の著作からかなりの長さの文を引用するとき、あるいは図面、写真などを転載するときには、次に書くことを心得ていないと問題が起こる。まず、「正当な範囲」を超えて引用する場合には、著作権者の許諾を得なければならない。また、図面、写真などを転載する場合には必ず著作権者の許可を得る必要がある。これらの場合には、後日のことを考えて、依頼状を書き、書面で返事をもらっておくことを勧める。

原稿の書き方については、常識的な原稿用紙の使い方から数式の書き方、字体の指定などがあり、それぞれ細かい内容があるので、注意して書いてもらいたい。また、清書は原則としてペンまたはボールペンを使うべきだ。字体の指定その他は、本文とは別の色のペンや鉛筆で書きこむ。そして、清書は提出前に必ずコピーを取って保管すべきである。

理科系の仕事の文書でしばしば図や表がいちばん大切な役割を演じることを前に述べた。ここでは、その図や表の印刷原稿の作り方についての注意を述べる。まず、図や表はそれぞれ一つごとに紙をあらためて書き、必ず番号をつける。読者はしばしば図や表に最初に着目する——それだけしか見ない読者もある——ので、図にも表にも、番号に続けて必ず説明(キャプション)を書く。図では図の下に、表では表の上に説明をつけるのが原則だが、この原則に従わない学術雑誌もいくつかある。

研究、調査、その他、その文書の内容となる仕事に関して指導がある場合には、清書が終わった原稿をまずその人に見てもらって、意見を聞かなければならない。またそれとは別に、原稿をいちど他人に読んでもらって、間違っているところ、判らないところ、判りにくいところ、そのほか改良を要するところを指摘してもらうことを勧める。読み手としては、原稿の内容を大体は理解できる人、しかし詳しくは知らない人がいい。もしその人が文章に関心のある人ならば理想的である。読み手が見つからないときには、原稿をしばらく寝かせておいてから読み直すといい。

校正は、最高の注意を払って自分で見るのは当然だが、自分で読んだ上でもういちど他人に見てもらうのが理想である。自分で読むと、文の続きや中身がわかりすぎていて、なんと読んでも誤植を見逃すことが多いからである。清書のコピーはそのためにも必要なのだ。校正に関して最後に一言。校正は原稿どおりに印刷できているかどうかをチェックする作業だから、校正の段階で原稿から逸脱した修正を加えることは、原則として許されない。

作文技術の話の最後に、理科系の仕事の文書の例として表記の3つ(手紙・説明書・原著論文)を選んで、各論をこころみる。

ここで、手紙というのは仕事上での用件の手紙を意味する。この種の手紙についての心得としていちばん大切なのは、手紙を受け取ったらすぐに返事を書くことである。応えるのに時間のかかるものであっても、手紙を受け取ったという旨をメモ書きでいいので返すべきである。形式にもそって書くべきであるが、その内容はもっとも簡潔に、しかし要点は残りなく言いつくすように、書かなければならない。

次に、説明書であるが、その内容はおよそ次の 2 つに分かれる。(a)機構の説明(b)手引きである。これらのなかでしばしば定義的な説明が必要になるので、(c)ことば、概念の定義的な説明も加えることにする。これらを書く場合は、書く人の頭のなかに満ち溢れている書くべき情報を整理して、読者にとって必要なものだけを洗い出すことが要件となる。もっと具体的にいえば、この説明書は、誰が、どういう目的で、いつ、どこで読み、どう利用するのかを考え、それに適するように情報を選択・配列することが第一の仕事である。それには、いろいろに想定した場面で、いろいろに想定した読者が、何をどの順序に知りたがるかを考えてみる思考実験が必要なのである。

説明書は一種の教育を目的とするものである。教育のための最良の道は、いちばん無駄の少ない、繰り返しのない、理論的に筋の通った道とはかぎらないのである。したがって、思考実験だけでいいわけではない。作文技術も必要なのである。そこで、とくに注意すべき点は次の 3 つである。

- (a) 使用説明書の読者は気短で、手っ取り早く要点を知りたがる。できれば面倒なことは読まないですませたいのだ。だから、重点先行主義の、簡潔な表現に徹し、また読者が説明書のなかから自分の知りたいことをぱっと見つけられるように、レイアウトを工夫しなければならない。
- (b) 予想される読者の予備知識の程度に合わせて言葉を選び、必要に応じて用語の説明を加える必要がある。定義のあいまいな用語を使ったり、類似語を混用したりすることは禁物である。
- (c) 写真と図をうまく使うこと。写真よりも、細部を適当に省略した図の方が要点をつかみやすいことが多い。

自然科学の論文は、学術雑誌に発表するのが原則である。最近の分類では、これらの論文はおよそ次の 4 つに大別されている：(a)原著論文(b)短報(c)総合報告(d)レターである。

原著論文は、新しい研究を記述するものでなければならない。しかも、読者が追試を試みようとするとき、または著者の論理を追跡しようとするときに必要な情報を、洩れなく書きこんだものでなければならない。

短報は、ふつう印刷面で 1 ページ(たかだか 2 ページ)以内の記事である。短報のうち最も重要なものは予報または速報で、これはとくに急いで発表する価値のある研究内容を、原著論文に先立って投稿するものである。短く書かなければならないので、原著論文とは違って、内容をチェックするには記述が不十分でも許容される。

総合報告は、特定の主題についてすでに発表された情報を集めて分析・検討するものである。著者の見解や見通しが強く打ち出されたものと、情報を公平に集め、コンパクトにまとめることに主眼があるものがある。どちらの場合も、文献引用は網羅的であってほしい。

レターは原著論文と同格の内容を、発表を急ぐためにきわめて簡潔にまとめたものである。研究の進み方が早くなってきたので、最も重要な成果をレターのかたちで発表し、しかもそれだけで終わる例が多くなってきた。したがってレターには、内容のチェックに必要な情報をできるだけ盛り込むことが望ましい。

前述の原著論文の項で「新しい研究」と書いたときの＜新しい＞という限定は、＜まだ何人も公表していない＞という意味で、原著論文、予報・速報、レターの第一の要件はその主な内容がこの意味で新しいことである。オリジナリティーに関連して、自分の研究をこれらのかたちで印刷公刊しようとする人は、次のことに注意されたい。(a) いちど印刷公刊された論文と同じ内容のものを他の学術雑誌などに投稿すること、また実質的に同じ論文を同時に 2 つの雑誌に投稿することは許されない。(b) 論文が印刷公刊されると、その内容に関する特許の出願権が制約される。

研究は発表してはじめて完結する。また、論文は読まれてはじめて役に立つ。原稿を書き始める前には、十分な時間

を準備に費やすべきである。この準備作業には、先に書いた内容が役に立つだろう。では、実際に書くときにあたって注意する点を以下に述べる。

まず、表題には「何を」研究したかを具体的に示す。また、「どんな方法で」研究したかも示してほしい。抽象的・一般的すぎる表題は望ましくない。表題が短いことはもちろん望ましいが、適切に内容を示すことが第一の要件だ。最近では表題はくもっとも短い抄録>の役を果たすべきだという考えが強くなり、これにともなって長めの表題が多くなってきた。

研究機関名としては、その研究を行った研究機関名を書く。著者の現所属機関がこれと異なる場合には、脚注として現所属機関を示す。研究機関名には、郵便が届く程度に詳しくアドレスを書く必要がある。

受理年月日の欄には、原稿が到着した日付を雑誌の編集部で記入する。万一、他の研究者がほとんど同時に同様の結果を発表して、どちらの発見が早かったかという紛争が起こった場合には、受理年月日によって優先順位が決まる。

本文は、序論、本論、研究結果の考察、そして結論というのが標準的な構成である。さらにその後に結論またはまとめをつけることもあるが、これはとくに長い論文の場合にかぎる。これら、それぞれの詳しい内容に関しては上田良二教授の書かれたもの¹⁾²⁾の一読を勧める。

最後に、研究者にとって大切な学会講演の要領を述べる。ここに述べることは、学会とかぎらず、多くの人の前で話をするときの参考になるだろう。

講演で原稿を「読む」のは禁物である。それは、目で読むための文章と耳で聞くための文章とは構成に差があるからである。だからといって原稿が要らないわけではない。少なくとも初心のうちは、十分に推敲した原稿を用意すべきである。欧州では、正式の挨拶や講演は原稿を手にしてするのが礼儀とされる。ただ、スライドやOHPを使うことが多い私たちの講演では、これはあまり便利でない。したがって、いざ壇に上がったときには簡潔で見通しのいいメモを見ながら話したほうがいい。

話の構成としては、最初の1分内外でどんな研究をしたのか、その結果はどうなのかを簡潔に述べる。そして、残りの9分を序論、研究方法、結果、議論の4つに均等に割り振るつもりで話を組立てると具合がいい。また、総合講演の最後の辺では、本当の第一線の成果を紹介・論評することになるだろうから、専門家にしかわからない話になっても致し方ない。しかし、最初の1/3はその会場の全ての聴衆にわかるように、また中間の1/3も大部分の聴衆が「わかったような気がする」レベルで話さなければならないというのが総合講演の心得である。そのためには、本質的なものだけをずばり話すことが必要である。また、そのためには原稿をはっきりしたパラグラフに分けて書く必要があるのだ。

スライドの原稿については10分講演なら78枚が限度と考えて全体の計画を立てるといい。また、その大きさも、会場の最後部の人が読めるくらい大きいものもいい。そして、スペースも有効に使うべきである。行間や天地・左右を空けすぎるのはスペースの無駄使いである。

次に、講演で見るメモについて述べておきたい。メモの中身としていちばん大切なのは、話のどの部分に何番のスライドを使うか、そのスライドの内容は何か、がはっきりわかるようにしておくことである。大事な材料は原則として全部スライドに入れてあるはずだから、そのスライドを間違いなく使いこなせるようにすることが、メモの眼目なのである。

この他にメモに記入するのは、話の段落を示す仕切り線の類、スライドに入っていない内容などである。また、メモは最大限に略字を活用し、字数を少なくするのがいい。そして、スペースの許すかぎり太い字で書くのがいい。

話し方にも様々な要件がある。まずは明快であること。ずばりと事実を述べ、自分の考えを主張してもらいたい。発音

も明快にし,ことばの切り方に気を配って,聞き取りやすくすることにも心すべきである.これにはアナウンサーの発声法や抑揚が参考になる.さらに,マイクの使い方,適当な間を空けることなども習得しておくといい.

参考文献(要約のひとつであり,要約するに当たって参考にしたものではない)

- 1) 上田良二:「論文を書くにあたっての心構え」,日本物理学会会誌,16(1961)345.
- 2) 上田良二:「論文を書くにあたっての心構え」,『Journal の論文をよくするために』,増訂版,(日本物理学会,1975), p.127.

4. 誘電率の測定原理

ここでは、誘電率の測定原理について学んだ事柄を示す。

4.1 誘電率の測定は静電容量の測定

面積 A の 2 枚の金属板が間隔 d で平行におかれているとする。これは、平行板コンデンサー [parallel plate capacitor] であり、その電気容量について考える。金属両極板の間に電位差 V を加えると、極板間の電場の強さ E は

$$E = V/d \quad (4.1)$$

である。

ところで、電場の強さ E はクーロンの法則より

$$E = \frac{F}{Q} = \hat{r} \frac{Q}{4\pi\kappa\epsilon_0 r^2} \quad (4.2)$$

で与えられる。ただし、 F は単位電荷に働く力、 $\hat{r}$ は Q と単位電荷を結ぶ直線の方法の単位ベクトル、 ϵ_0 は真空誘電率 [permittivity of vacuum]、 κ は電荷がおかれている媒質 (誘電体) の比誘電率 [dielectric constant]、 r は電荷からの距離である。

したがって、両極板上の電荷をそれぞれ $+Q$ 、 $-Q$ とすれば、式 (4.1)、(4.2) より

$$Q = \kappa\epsilon_0 EA \quad (4.3)$$

となる。ここで、極板上の電荷 $+Q$ から $-Q$ にいたる誘電束は、対向している極板の間の空間にのみ集中し、極板の端で外部には漏れていないとする。コンデンサーの電気容量 C を単位電位差当たりの極板上の荷電量と定義すれば、式 (4.3) を使って

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\kappa\epsilon_0 A}{d} \quad (4.4)$$

となる。これは、平行板コンデンサーの電気容量に関する公式といえる。また、極板間の空間が真空の場合の容量 C_0 は

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (4.5)$$

であり、これは極板の幾何学的形状のみで決まるので幾何学的容量 [geometric capacitor] ともいわれている。式 (4.5) を用いれば、任意の媒質 (誘電体) で満たされたコンデンサーの電気容量 C は

$$C = \kappa C_0 \quad (4.6)$$

と表される。

以上のことから、誘電率 $\epsilon = \kappa\epsilon_0$ を測定するには静電容量 C を測定すればいいということがわかる。

4.2 静電容量の測定方法

静電容量の測定方法には、(1)ブリッジ法 (シェーリングブリッジ法、超低周波ブリッジ法、変成器ブリッジ、並列 T 形ブリッジ etc...)、(2)インピーダンス法 (集中定数回路法)、(3)共振法 (Q メーター)、(4)ヘテロダイナイト法などがある。

ブリッジ法とは、個々のブリッジによって回路は異なるが、原理的には図 4.1 に示すような構成になる。 Y_1 、 Y_2 はブリッジの比例辺を表し、抵抗、コンデンサー、インダクタンスを用いる。 Y_{ref} は基準辺を表し、基準容量のコンデンサーと基準

抵抗の組み合わせを用いる。Y_u が測定する未知試料コンデンサーである。また、OSC は発振器、DET は平衡検出器を示している。ブリッジの平衡条件は、各辺のアドミッタンスを Y₁, Y₂, Y_{ref}, Y_u とすれば次式で与えられる。

$$\frac{Y_1}{Y_2} = \frac{Y_{ref}}{Y_u} \quad (4.7)$$

ブリッジの回路によっては、インピーダンス Z₁, Z₂, Z_{ref}, Z_u を考えたほうが便利な場合もある。

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_{ref}}{Z_u} \quad (4.8)$$

発振器からの交流信号をブリッジに与え、比例辺あるいは基準辺のアドミッタンスを変化して、平衡検出器に流れる電流が零になった状態(平衡状態)で式(4.7)、(4.8)を解くことで、Y_u あるいは Z_u がわかるので、そこから誘電率、誘電損失などを計算することができる。

発振器は周波数の安定な出力波形ひずみの少ないものを用い、出力インピーダンス 600[Ω]あるいはそれ以下で数[V]以上の出力電圧のものが望ましい。平衡検出器には、高感度の選択増幅器と適当な指示器を用いる。

集中定数回路法の測定法では、インピーダンスあるいはアドミッタンスを用いるのが便利である。電圧と電流を測定し、その値からインピーダンスあるいはアドミッタンスを求めれば、ブリッジ法と同様に計算で誘電率、誘電損失などを導出することができる。

共振法は、LC 共振回路の共振周波数ωがよく知られたように

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4.9)$$

で与えられ、L が一定ならば C だけで ωが決まることを利用するものである。すなわち C として試料コンデンサーを入れ、共振の様子から試料の容量成分と抵抗成分を求めるというものである。

また、共振法によって試料の Q 値を直読したいときには Q メーターが便利であり、小さい電気容量や電気容量の小さい変化を測定しなければならないときには、3 つの共振回路を用いたうなり法が便利である。

ヘテロダインビート法は、2 つの LC 発振回路の周波数が等しくなるのを利用して、可変コンデンサを用いて未知の試料の容量を測定する方法である。

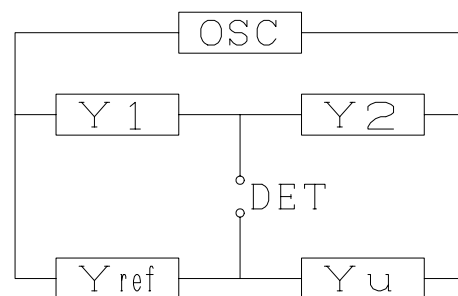


図 4.1 ブリッジ法の原理図

5. 実験の理論

以上の中で、今回の実験で使用した方法はインピーダンス測定法である。

その理由は、いくつかの静電容量測定方法の中で、現在の主な静電容量自動測定機器で採用されており、実験自体も比較的短い時間で行うことができ、実験準備も容易であるからである。

また、本研究ではマニュアル測定と対比するために、内部でインピーダンス測定法(詳細は不明)を用いている(株)日置電気製の Z HITESTER 3531(以下 ZH と表記)の測定データを使用した。

実験では、未知のコンデンサー C(直列容量成分 C_s 、直列抵抗成分 R_s)と既知の抵抗 R を直列に接続し、周波数 f の電源電圧 V を加えた。そして、コンデンサーにかかる電圧 V_c 、抵抗にかかる電圧 V_r のみを測定して未知のコンデンサー C の並列容量成分 C_p 、並列コンダクタンス成分 G_p 、誘電正接 D 、全電圧 V と全電流 I の偏角 θ_s 、コンデンサにかかる電圧 V_c と全電流 I の偏角 θ 、コンデンサー C のインピーダンス Z_c を算出するというを行った。ここでは、この実験の理論的正しさを示すために数学を用いて既知量から未知量が導けることを証明する。

はじめに、アプリケーションソフト『Mathematica』を用いて以上の内容を証明した。以下にその内容を示す。

given : $V, V_c, V_r, \omega (= 2\pi f), R$

unknown : $V_{ccs}(C_s \text{ にかかる電圧}), V_{crs}(R_s \text{ にかかる電圧}), C_s, R_s,$

$I(\text{回路に流れる電流の実効値})$

$$\text{sol1} = \text{Solve}[\{V_c == \sqrt{V_{cr}^2 + V_{ccs}^2}, V == \sqrt{(V_r + V_{cr})^2 + V_{ccs}^2}, \\ V_{ccs} == \frac{I}{\omega C_s}, V_{crs} == I \cdot R_s, V_r == I \cdot R\}, \{V_{ccs}, V_{crs}, C_s, R_s, I\}]$$

$$V_{ccs} = \frac{\sqrt{(V + V_c + V_r)(V - V_c + V_r)(V + V_c - V_r)(-V + V_c + V_r)}}{2 \cdot V_r} \quad (5.1)$$

$$C_s = \frac{2 \cdot V_r^2}{R \cdot \omega \cdot \sqrt{(V + V_c + V_r)(V - V_c + V_r)(V + V_c - V_r)(-V + V_c + V_r)}} \quad (5.2)$$

$$V_{crs} = \frac{V^2 - V_c^2 - V_r^2}{2 \cdot V_r} \quad (5.3)$$

$$R_s = \frac{R(V^2 - V_c^2 - V_r^2)}{2 \cdot V_r^2} \quad (5.4)$$

式(5.1) (5.4)は、Solve 中にある式を連立方程式として『Mathematica』に解かせた解である。また、連立方程式の各式は、現在仮定している内容からすれば、当然成立する式だといえるので、ここからも導かれた解が正しいと言える。

ところで、未知のコンデンサーの並列容量成分 C_p は C_s と R_s で以下のように表することができる。

$$C_p = \frac{C_s}{1 + (\omega C_s R_s)^2} \quad (5.5)$$

したがって、式(5.2)、(5.4)を用いると

$$Cp = \frac{\sqrt{(V + Vc + Vr)(V - Vc + Vr)(V + Vc - Vr)(-V + Vc + Vr)}}{2 \cdot R \cdot Vc^2 \cdot \omega} \quad (5.6)$$

と表せる．

同様にして，未知のコンデンサーの並列抵抗成分 Gp ，誘電正接 D ，全電圧 V と全電流 I の偏角 θ_s ，コンデンサにかかる電圧 Vc と全電流 I の偏角 θ ，コンデンサー C のインピーダンス Zc は Cs と Rs ， $Vccs$ ， $Vcrs$ ， Vr で以下のように表すことができる．

$$Gp = \frac{\omega^2 Cs^2 Rs}{1 + (\omega Cs Rs)^2} \quad (5.7)$$

$$D = \omega Cs Rs \quad (5.8)$$

$$\theta_s = \tan^{-1} \frac{Vccs}{Vr + Vcrs} \quad (5.9)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{Vccs}{Vcrs} \quad (5.10)$$

$$Zc = \sqrt{Rs^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot Cs} \right)^2} \quad (5.11)$$

したがって，式(5.1) (5.4)を用いると

$$Gp = \frac{V^2 - Vc^2 - Vr^2}{2 \cdot R \cdot Vc^2} \quad (5.12)$$

$$D = \frac{V^2 - Vc^2 - Vr^2}{\sqrt{(V + Vc + Vr)(V - Vc + Vr)(V + Vc - Vr)(-V + Vc + Vr)}} \quad (5.13)$$

$$\theta_s = \tan^{-1} \frac{\sqrt{(V + Vc + Vr)(V - Vc + Vr)(V + Vc - Vr)(-V + Vc + Vr)}}{(V^2 - Vc^2 + Vr^2)} \quad (5.14)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\sqrt{(V + Vc + Vr)(V - Vc + Vr)(V + Vc - Vr)(-V + Vc + Vr)}}{(V^2 - Vc^2 - Vr^2)} \quad (5.15)$$

$$Zc = \frac{R \cdot Vc}{Vr} \quad (5.16)$$

と表せる．

ここで，実験のモデルとして考えた電圧ベクトル図を図 5.1 に示す．

このベクトル図において，三角関数の正弦定理，余弦定理から導かれるヘロンの公式によると，

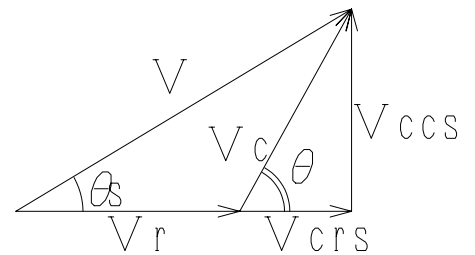


図 5.1 電圧ベクトル図

$$S = \frac{\sqrt{(V + Vc + Vr)(V - Vc + Vr)(V + Vc - Vr)(-V + Vc + Vr)}}{4} \quad (5.17)$$

が言える。ただし、 S は電圧ベクトル V, V_c, V_r で囲まれた三角形の面積を示している。

ヘロンの公式とは、三角形の面積 S が三角形の各辺の長さ a, b, c によって表されることを示した式であり、次式で表される。

$$S = \sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)} \quad : s = \frac{a+b+c}{2} \quad (5.18)$$

この式より、式(5.17)は容易に導かれる。また、余弦定理

$$a^2 - b^2 - c^2 = -2 \cdot b \cdot c \cdot \cos A \quad (5.19)$$

を図 5.1 に適用すれば

$$V^2 - V_c^2 - V_r^2 = 2 \cdot V_c \cdot V_r \cdot \cos \theta \quad (5.20)$$

が導かれる。

ここで、式(5.17)、(5.20)を式(5.1) (5.4)に適用すると

$$V_{ccs} = \frac{2S}{V_r} \quad (5.21)$$

$$C_s = \frac{V_r}{2S} \cdot \frac{V_r}{R} \cdot \frac{1}{\omega} \quad (5.22)$$

$$V_{crs} = V_c \cdot \cos \theta \quad (5.23)$$

$$R_s = \frac{R}{V_r} V_c \cdot \cos \theta \quad (5.24)$$

となる。

式(5.21)は、三角形の面積の公式である面積 = 底辺 × 高さ ÷ 2 を示しており、式(5.23)は三角関数の定義そのままを示している。したがって、式(5.1)、(5.3)は証明されたと言える。

また、式(5.22)と式(5.24)の右辺にある V_r / R は回路に流れる電流 I を示しているので、式(5.21)、(5.23)と電流 I を用いて式(5.22)、(5.24)をあらためて示すと

$$C_s = \frac{I}{V_{ccs}} \cdot \frac{1}{\omega} \quad (5.25)$$

$$R_s = \frac{V_{crs}}{I} \quad (5.26)$$

となり、これらは『Mathematica』で解かせた連立方程式の元の式であるので、式(5.2)、(5.4)は証明されたと言える。

同様にして、式(5.6)、(5.12) (5.16)はそれぞれ

$$C_p = \frac{2S}{R} \cdot \frac{1}{\omega} \cdot \frac{1}{V_c^2} = \frac{2S}{V_r} \cdot \frac{V_r}{R} \cdot \frac{1}{\omega} \cdot \frac{1}{V_c^2} = V_{ccs} \cdot I \cdot \frac{1}{\omega} \cdot \frac{1}{V_c^2} \quad (5.27)$$

$$G_p = \frac{2 \cdot V_c \cdot V_r \cdot \cos \theta}{2 \cdot R \cdot V_c^2} = \frac{V_r}{R} \cdot \frac{1}{V_c^2} \cdot V_{crs} = I \cdot \frac{1}{V_c^2} \cdot V_{crs} \quad (5.28)$$

$$D = \frac{2 \cdot V_c \cdot V_r \cdot \cos\theta}{4S} = \frac{V_r}{2S} V_c \cdot \cos\theta = \frac{V_{crs}}{V_{ccs}} = R_s \cdot C_s \cdot \omega \quad (5.29)$$

$$\theta_s = \tan^{-1} \frac{2S}{V \cdot V_r \cdot \cos\theta_s} = \tan^{-1} \left(\frac{2S}{V_r} \cdot \frac{1}{V_r + V_{crs}} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{V_{ccs}}{V_r + V_{crs}} \right) \quad (5.30)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{2S}{V_r \cdot V_c \cdot \cos\theta} = \tan^{-1} \left(\frac{2S}{V_r} \cdot \frac{1}{V_{crs}} \right) = \tan^{-1} \frac{V_{ccs}}{V_{crs}} \quad (5.31)$$

$$Z_c = \frac{R}{V_r} \cdot V_c = \frac{V_c}{I} \quad (5.32)$$

と表される。式(5.29) , (5.30) , (5.31)は定義式(5.8) , (5.9) , (5.10)と同様であるので, 式(5.13) , (5.14) , (5.15)は証明されたと言える。また, 式(5.32)はインピーダンスの意味から考えて当然成り立つ式だと言えるので, 式(5.16)は証明されたと言える。

ここで, 式(5.27) , (5.28)より

$$V_c^2 = V_{ccs} \cdot I \cdot \frac{1}{C_p \cdot \omega} \quad (5.33)$$

$$V_c^2 = V_{crs} \cdot I \cdot \frac{1}{G_p} \quad (5.34)$$

となる。ところで, 三平方の定理より

$$V_c^2 = V_{crs}^2 + V_{ccs}^2 \quad (5.35)$$

が成り立つので, これを式(5.33) , (5.34)に代入すると

$$\begin{aligned} V_{crs}^2 + V_{ccs}^2 &= V_{ccs} \cdot I \cdot \frac{1}{C_p \cdot \omega} \\ V_{crs} \cdot \frac{V_{crs}}{V_{ccs}} + V_{ccs} &= \frac{I}{C_p \cdot \omega} \\ D \cdot V_{crs} + V_{ccs} &= \frac{I}{C_p \cdot \omega} \\ D \cdot I \cdot R_s + \frac{I}{C_s \cdot \omega} &= \frac{I}{C_p \cdot \omega} \\ D \cdot R_s + \frac{1}{C_s \cdot \omega} &= \frac{1}{C_p \cdot \omega} \\ C_p &= \frac{1}{D \cdot R_s \cdot \omega + \frac{1}{C_s}} \\ C_p &= \frac{C_s}{D \cdot R_s \cdot \omega \cdot C_s + 1} \\ C_p &= \frac{C_s}{1 + (R_s \cdot C_s \cdot \omega)^2} \end{aligned} \quad (5.36)$$

$$\begin{aligned}
V_{crs}^2 + V_{ccs}^2 &= V_{crs} \cdot \frac{I}{G_p} \\
V_{crs} + V_{ccs} \cdot \frac{V_{ccs}}{V_{crs}} &= \frac{I}{G_p} \\
V_{crs} + \frac{1}{D} \cdot V_{ccs} &= \frac{I}{G_p} \\
I \cdot R_s + \frac{1}{D} \cdot \frac{I}{C_s \cdot \omega} &= \frac{I}{G_p} \\
R_s + \frac{1}{D \cdot C_s \cdot \omega} &= \frac{1}{G_p} \\
G_p &= \frac{1}{R_s + \frac{1}{D \cdot C_s \cdot \omega}} \\
G_p &= \frac{D \cdot C_s \cdot \omega}{D \cdot R_s \cdot \omega \cdot C_s + 1} \quad (5.37) \\
G_p &= \frac{R_s \cdot C_s^2 \cdot \omega^2}{1 + (R_s \cdot C_s \cdot \omega)^2}
\end{aligned}$$

となる．上式は定義式(5.5)，(5.7)と等しいので，式(5.6)，(5.12)は証明されたと言える．

すなわち，既知量である抵抗 R ，電源電圧 V ，電源周波数 f ，コンデンサーにかかる電圧 V_c ，抵抗にかかる電圧 V_r から，未知量であるコンデンサー C (直列容量成分 C_s ，直列抵抗成分 R_s) とコンデンサーの並列容量成分 C_p ，並列コンダクタンス成分 G_p ，誘電正接 D ，全電圧 V と全電流 I の偏角 θ_s ，コンデンサにかかる電圧 V_c と全電流 I の偏角 θ ，コンデンサー C のインピーダンス Z_c を算出することができるといえる．

6. 実験方法

図 6.1 のように抵抗 R とコンデンサ C (抵抗成分 R_s ，容量成分 C_s と仮定する) を直列接続し，正弦波を加える．

電源電圧 V ，抵抗両端電圧 V_r ，容量両端電圧 V_c をマルチメータ (測定周波数 20[Hz] 100[kHz]) とオシロスコープ (同 10[Hz]，200 2000[kHz]) で測定し，式(5.6)，(5.12) (5.16) から C_p ， G_p ， D ， θ_s ， θ ， Z_c を求め，それぞれの周波数依存性を観測する．ただし，抵抗 R の値はマルチメータで測定したものを使用し，抵抗およびリード線のインダクタンス成分は無視して考える．

7. 実験結果および考察

図 7.1 ～ 7.4 にセラミックコンデンサ 47[nF] と炭素皮膜抵抗 6.8[k Ω] を組み合わせたときの C_p ， D ， θ_s ， θ ， Z_c の周波数依存性を示す．また，それぞれの図には Z_H の測定データも示す．

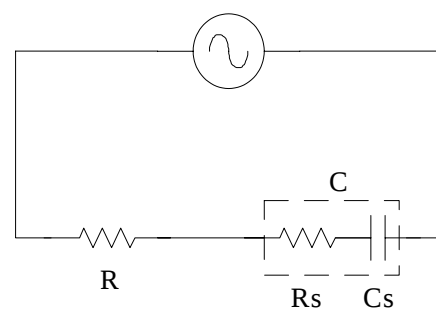


図 6.1 計測時の回路モデル

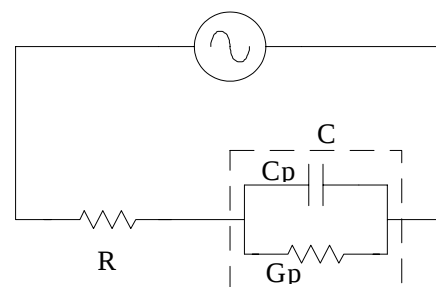


図 6.2 観測時の回路モデル

ZH の測定値と表示値との誤差原因としては、製造時における誤差と、測定方法と素子・周波数との不一致が考えられる。また、ZH の同軸ケーブルが ZH の付属品 (50[Ω]) でなく、75[Ω] の同軸ケーブルを使用しているところにも誤差原因があると考えられる。

マルチメータの測定値に見られる下降は、測定機器の内部装置が高周波に影響されていることが原因であると考えられる。つまり、本研究におけるマルチメータの実質的な測定範囲は、20[Hz] ~ 10[kHz]であるといえる。

オシロスコープの測定値にはバラツキがある。これは、測定点を多く取れば多少改善されと考えられるが、アナログ波形では精密な値が測定できないので、本研究の方法ではそれほど改善されるとは考えられない。

8. まとめ

本研究では、周波数領域 10[Hz] ~ 5[MHz]におけるセラミックコンデンサの周波数依存性を ZH、マルチメータ、オシロスコープで測定した。

実験結果から、測定法や測定機器にはそれぞれ適した測定周波数と測定対象があることがわかった。

参 考 文 献

- Raymond A. Serway 著 松村 博之訳:科学者と技術者のための物理学 電磁気学, (学術図書, 1995), p.732.
- 蒲生 良治編:トランジスタ技術 SPECIAL No.28, (CQ 出版, 1991), p.6.
- 電気学会通信教育会:電気学会大学講座 誘電体現象論, (電気学会, 1973), p.83.
- 中村 輝太郎・作道 恒太郎・石橋 善弘・富永 靖徳:物性科学選書 強誘電体と構造相転移, (裳華房, 1988)
- 木下 是雄:理科系の作文技術, (中央公論新社, 1981), p.2.
- 社団法人日本化学会 編:新実験化学講座 5 基礎技術 4 電気, (丸善, 1976), p.265 ~ .
- 電気学会通信教育会 編:電磁気計測 改訂版, (電気学会, 1979), p.153 ~ .
- 小野 勇:電子機器・電気機器・電力用 コンデンサ活用マニュアル, (東京電機大学出版局, 1975), p.221 ~ .
- 本田 信, 柳川 洋:インピーダンス測定ハンドブック - インピーダンス測定とその応用 -, (日本ヒューレット・パッカード, 1990)p.1 ~ .
- 矢口 金次・八木谷 孝之・小野 勇 著:工学全書 No.112 コンデンサの性能と使い方, (東京電機大学出版局, 1964), p.56 ~ .
- 小出 昭一郎:物理学[三訂版], (裳華房, 1997), p.225 ~ .
- 衣川 浩平:コンデンサ 新版, (日刊工業新聞社, 1975), p.2 ~ . (岐大図書館)
- 増田 久喜:トランジスタ技術 SPECIAL No.47 §2, (CQ 出版, 1994), p.14 ~ .
- 小野 勇:電子機器・電気機器・電力用 コンデンサ活用マニュアル, (東京電機大学出版局, 1975 年), p.221,20 ~ .
- 近角 聰信 編, 中村 輝太郎 執筆:続・物性科学のすすめ, (培風館, 1980), p.83 ~ .

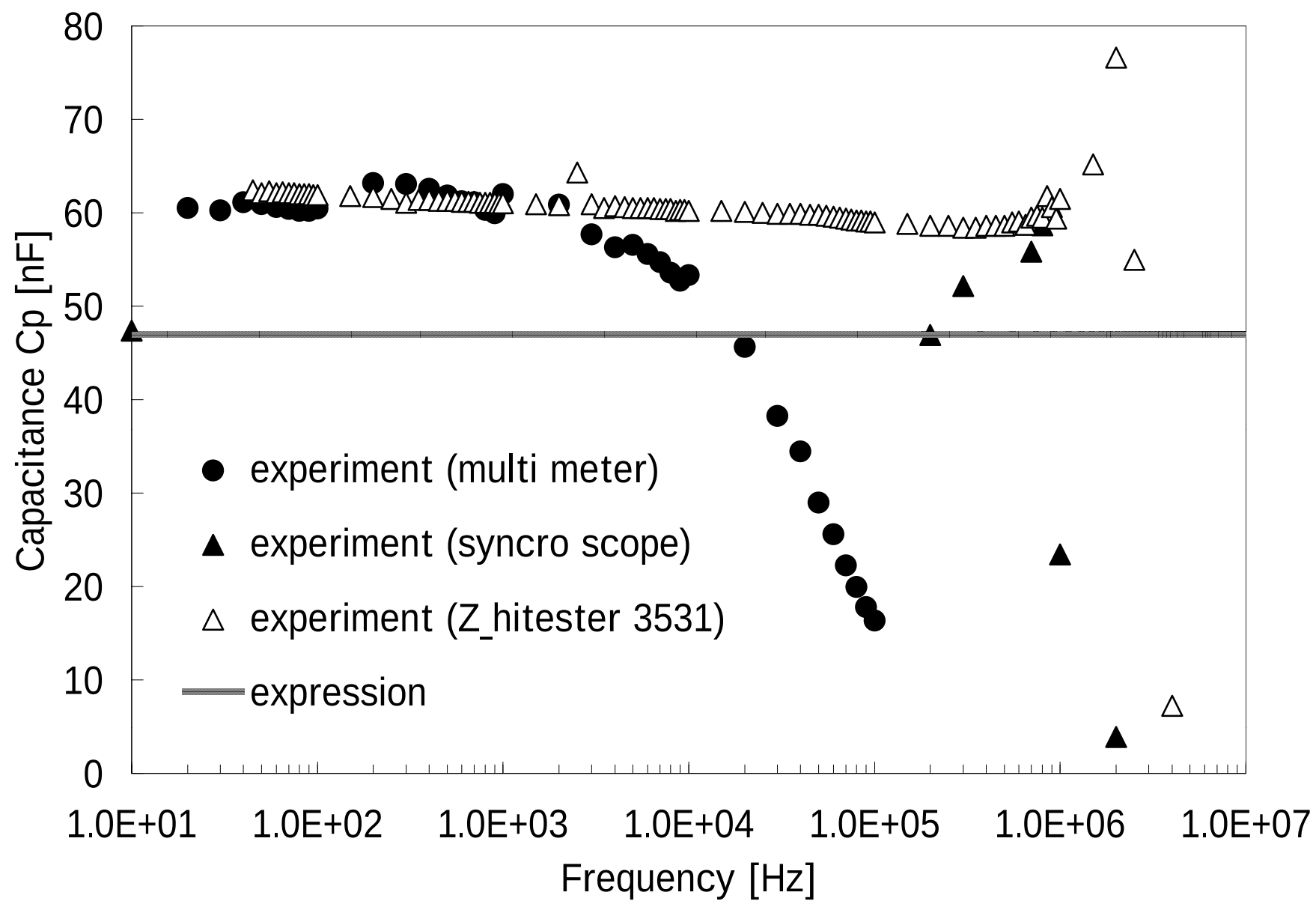


図 7.1 セラミックコンデンサの C_p の周波数依存性

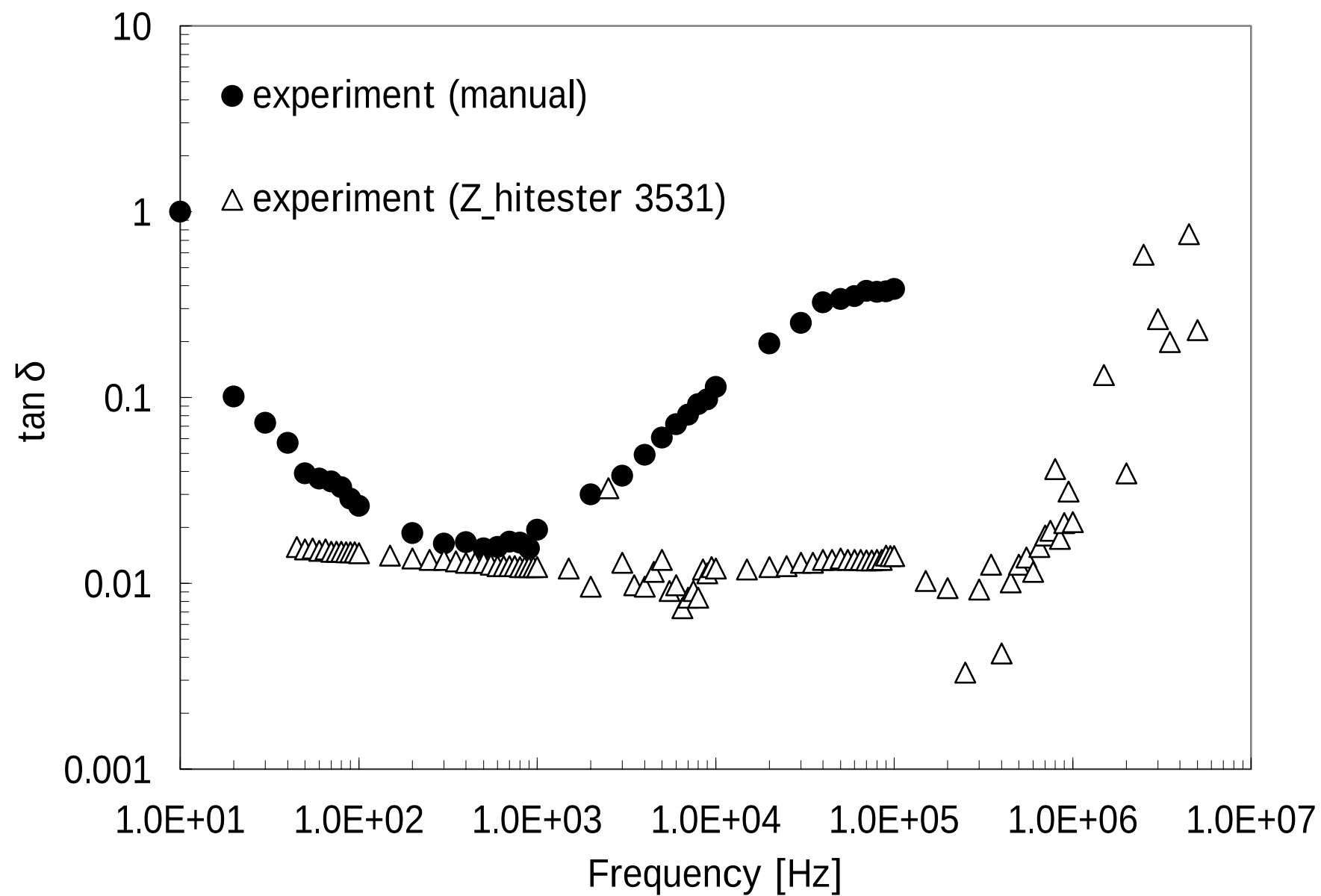


図 7.2 セラミックコンデンサの D の周波数依存性

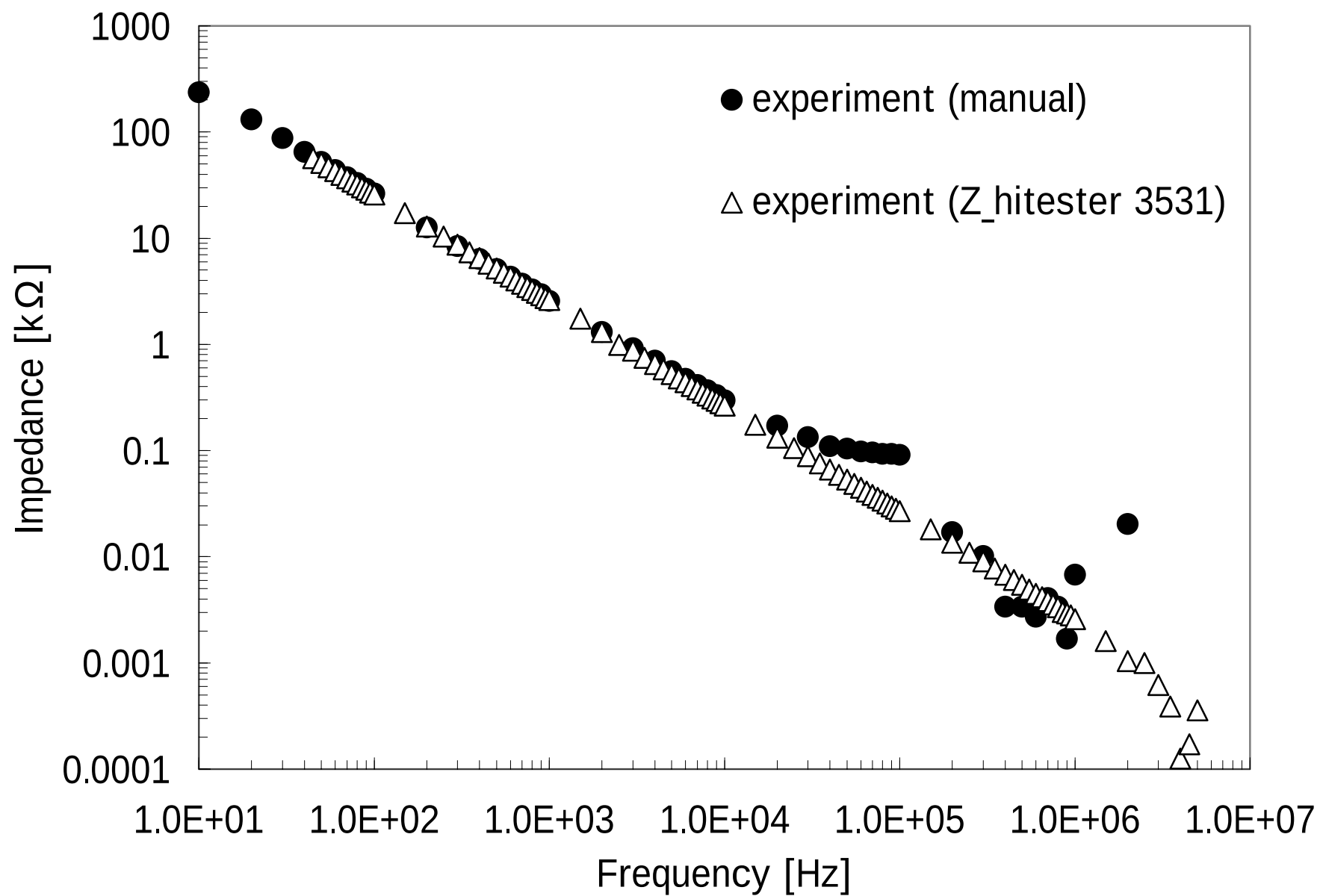


図 7.3 セラミックコンデンサの Z_c の周波数依存性

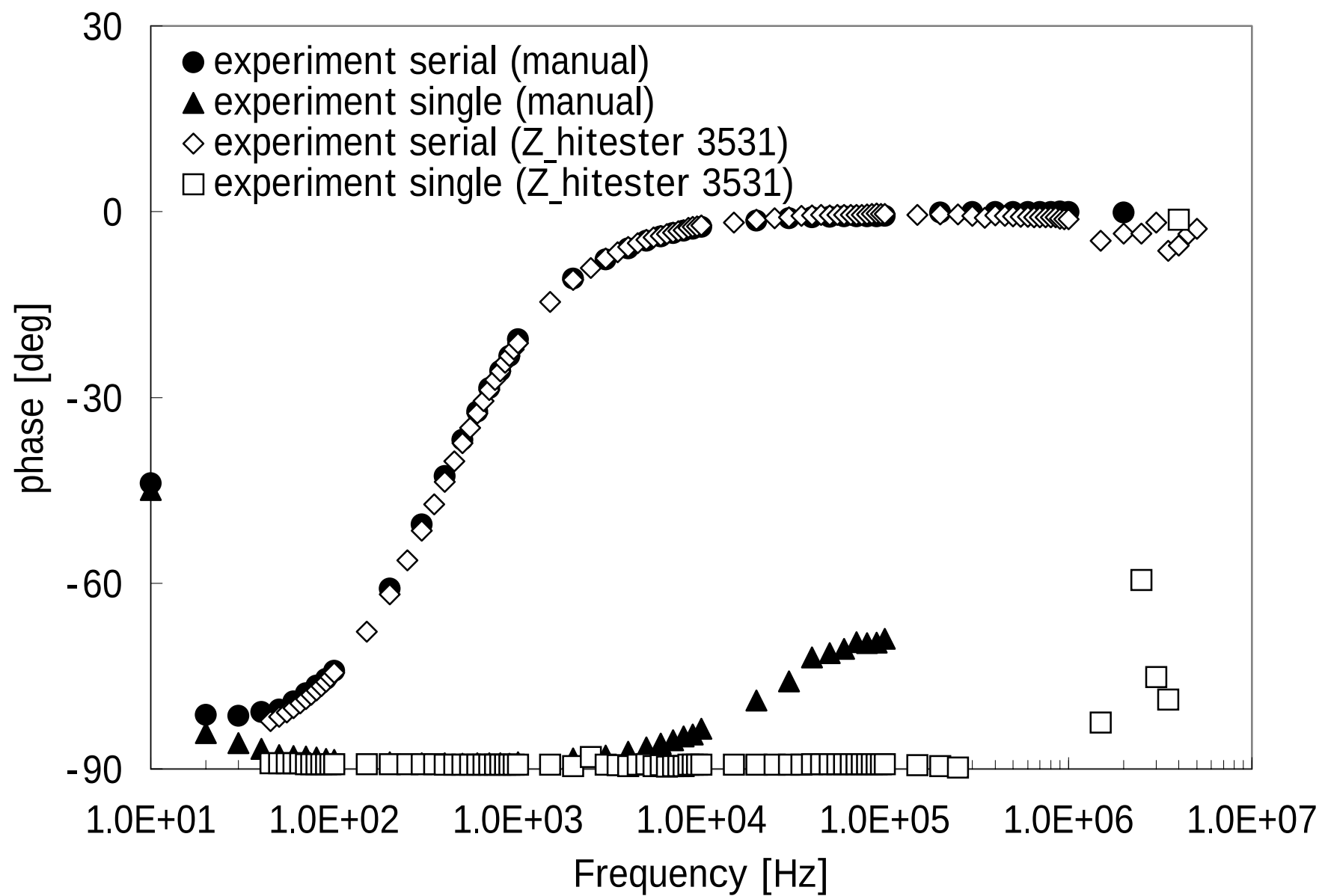


図 7.4 セラミックコンデンサの ϕ (serial), θ (single) の周波数依存性