

シミュレータによる磁気増幅器動作機構の解析

An Analysis of Performances of Self-saturating Magnetic Amplifiers with a Simulator

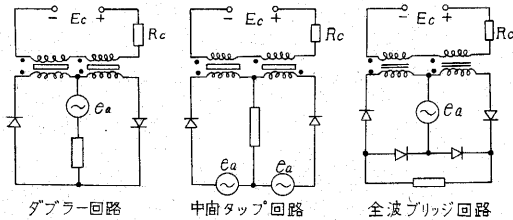
宮 本 明 雄

1. は し が き

自己飽和形磁気増幅器の動作および特性は多くの要因によってきまるので、その解析には複雑な非線形問題を解くことが要求される。従来、磁心リアクタ、整流器等の特性を適当に近似して線形な電気回路の問題として扱われる場合が多かった。最近になって磁心の磁化機構が明らかになるにつれ⁽¹⁾⁽²⁾、磁気増幅器の動作機構をより正確に解析しようとする試みが行なわれてきた⁽³⁾。ここに紹介するシミュレータは磁気増幅器における磁心の動特性、整流器の特性、残留インダクタンス等の影響を定量的に、かつ簡便に評価するための一つの方法として考案したものである。

2. シミュレーションのためのブロック線図表示

シミュレーションを行なうにあたって、磁気増幅器の動作機構をブロック線図に表示して理解しやすくする。ここで対象としているものは、自己飽和形磁気増幅器の基本回路であるダブル回路、中間タップ回路、全波ブリッジ回路の三つである。



第 1 図 磁気増幅器基本回路

さて、磁気増幅器の出力はリセット磁束量できまると考えられるので、リセット機構を調べる。転流を考えなければ、その基本方程式は、

$$N_o \frac{d\Phi_r}{dt} = E_o + e_c - i_o R_o \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$N_o i_o = f\left(\frac{d\Phi_r}{dt}, \Phi_r\right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 Φ_r はリセット磁束、 E_o は制御電圧、 e_c はゲート中のリアクタの誘起電圧、 i_o は制御電流である。(2)は磁心の磁化特性を表わしている。(1)を書き直して、

$$\Phi_r = \frac{R_o}{N_o} \int_0^t \left(\frac{E_o}{R_o} + \frac{e_c}{R_o} - i_o \right) dt \quad \dots\dots\dots (3)$$

一方、ゲート機構を考えると、角形ヒステリシス磁心

の場合には、一つ前の半周期での全リセット磁束を、 $\Delta\Phi_r(n-1)$ で表わして、

$$\Delta\Phi_r(n-1) = \frac{1}{N_g} \int_0^{\theta_f/\omega} (e_a - i_o R_{LG} - e_f) dt \quad \dots\dots\dots (4)$$

により点弧角 θ_f がきまる。ここで、 e_a は電源電圧、 i_o は励磁電流、 R_{LG} はゲート回路全抵抗、 e_f は整流器の順方向降下である。 $i_o R_{LG} \ll e_a$ 、 $e_f \ll e_a$ とすれば、平均出力電圧は、

$$E_o(n) = \frac{R_L}{R_{LG}} \left[E_a \frac{2}{\pi} - \frac{N_g}{T} \Delta\Phi_r(n-1) \right] \quad \dots\dots\dots (5)$$

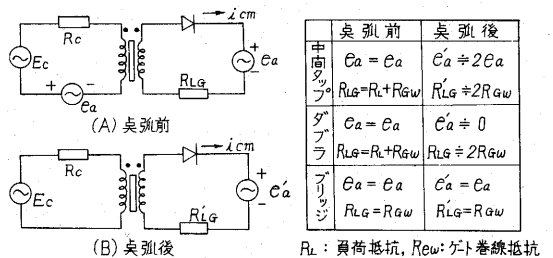
になる。

以上はもっとも基本的なはたらきのみを示したもので、実際にはもっと複雑なものになる。まず、転流効果を考えなければならない。これはリセット期間中に、本来電流阻止状態にあるべき整流器がゲート巻線誘起電圧により電流を通じ減磁アンペアターンを与えることによる。このことを考慮して、リセット基本方程式を書き改めると、

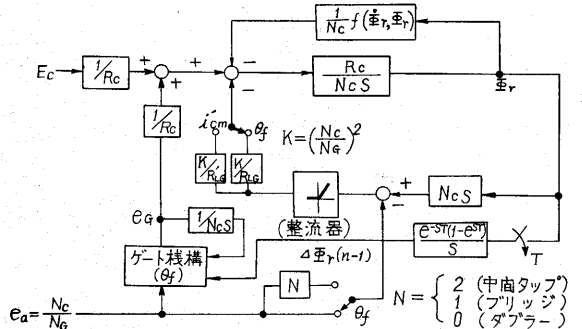
$$N_o \frac{d\Phi_r}{dt} = E_o + e_c - i_o R_o \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$N_o i_o = f(\dot{\Phi}_r, \Phi_r) + N_g i_{om} \quad \dots\dots\dots (7)$$

i_{om} は転流電流であり、 i_o は全制御電流である。この



第 2 図 磁気増幅器の等価回路



第 3 図 磁気増幅器のブロック線図

i_{om} については、既に菊池氏⁽⁴⁾らによって解析されている。

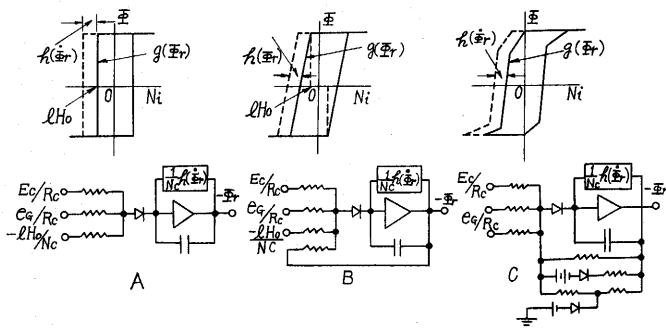
その結果を引用すると、リセット期間中のリアクタは第2図の等価回路によって表わすことができる。

この等価回路から、転流を考慮して磁気増幅器のブロック線図を作り上げると第3図のようになる。

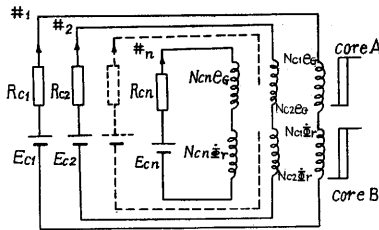
3. 各要素のシミュレーション

A. 磁心

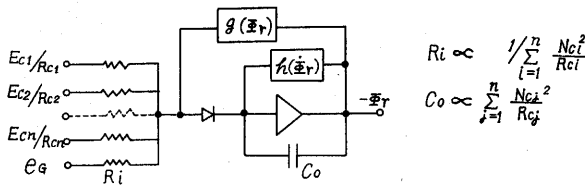
まず、磁心の磁化特性を知らなければならない。磁化特性が、



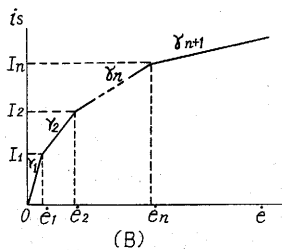
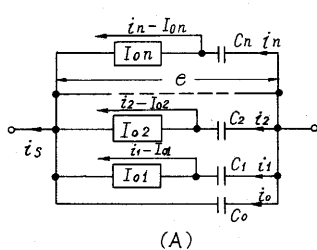
第4図 磁化特性のシミュレーション



第5図 多重制御回路



第6図 多重制御回路をもつ磁心のシミュレーション



第7図 非線形キャパシタンスの近似

$$N\phi_o = f(\Phi_r, \dot{\Phi}_r) = g(\Phi_r) + h(\dot{\Phi}_r) \dots\dots\dots (8)$$

のように Φ_r のみの項と $\dot{\Phi}_r$ のみの項とに分割できるものと仮定する。 $g(\Phi_r)$ は直流ヒステリシス曲線に相当し、 $h(\dot{\Phi}_r)$ は渦電流やスピン緩和効果を表わす。(3)(8)から、第4図のような回路によって磁心をシミュレートすることができる。

なお、制御回路が1個ではなく、第5図のように複数個ある場合には、そのシミュレーションは第6図のようになる。さて $h\left(\frac{d\Phi_r}{dt}\right)$ であるが、一般に第7図のような $\dot{\Phi}_r$ の非線形関数にある。もし線形関数であれば、 γ に比例した(線形)のキャパシタンスで実現できる。

$\gamma = \gamma(\Phi_r)$ の場合には、次に述べる方法で折線近似することができる。

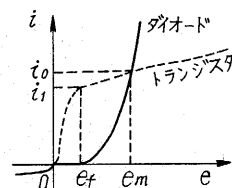
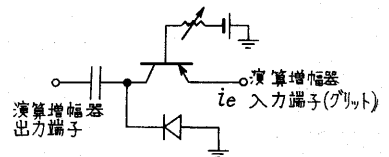
第7図(A)は並列コンデンサと電流制限要素とから成る近似非線形キャパシタンス回路である。 I_{on} は常に電圧降下が0で、 $i_n \leq I_{on}$ ではそのまま導体で接続した場合と同じであるが、 $i_n > I_{on}$ では通過する電流を I_{on} に制限し、残りの $i_n - I_{on}$ を積分器と無関係な所(アース)に側路させる働きを持つ。

$$C_1 i_1 = I_{o1}, C_2 i_2 = I_{o2}, \dots\dots C_n i_n = I_{on}$$

$$\dots\dots\dots (9)$$

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \gamma_1 - \gamma_2 \\ C_2 &= \gamma_2 - \gamma_3 \\ &\vdots \\ C_n &= \gamma_n - \gamma_{n+1} \\ C_0 &= \gamma_{n+1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

のように I_{oi}, C_i を選ぶことにより、第7図(B)の特性を実現できる。上に述べたような電流制限要素として、実際には第8図の回路を用いている。 $i_e < i_1$ ではダイオードは存在しないも同様でトランジスタのE-C間の電圧降下は小さい。 $i_e > i_1$ ではトランジスタのエミッタ電流は $i_e = i_0$ に押えられ、残りはダイオードに側路され、電圧降下も約0.3V程度である。



第8図 電流制限回路

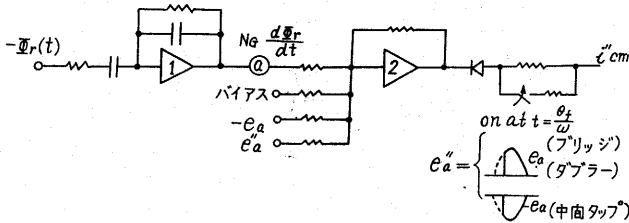
実際には、このような、磁心シミュレータを 2 個用い、相反的に、電源の半周期ごとに演算と前半周期の最終値のホールドをくりかえし行なわせ、それぞれの出力電圧を他の演算に利用している（この 2 個の磁心シミュレータは磁気増幅器の 2 個の磁心に対応している）。

B. ゲート機構

ゲート機構では、半周期前の全リセット磁束量から点弧角を決定し、さらにそれによってゲート誘起電圧 (e_g)、出力電圧を作り出す（詳細略）。

C. 転流効果

転流効果をシミュレートするためには、第 2 図の等価回路を利用して転流電流 i_{om} (制御回路側に換算) を算出して、減磁アンペアターンとして磁心シミュレータの入力に負帰還してやる。この場合、 e_a, R_{Lg} は点弧前後で変化するので、ゲート機構で検出した点弧角の瞬間にスイッ



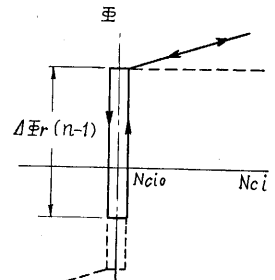
第 9 図 転流効果

チによる演算定数の切りかえを行なう。第 9 図は転流電流を算出する回路であるが、微分器の使用が避けられないので、高周波特性を補償したものを用いている。磁気増幅器回路の整流器の特性を一定電圧降下 (e_f) と順方向抵抗 (R_f) で表わせるとすると、 e_f によって第 9 図の演算増幅器 2 のバイアスがきまり、 R_f

によってゲインがきまる。

D. 残留インダクタンス

普通の磁心では、飽和後も多少とも相互インダクタンスを有するので、点弧後も制御回路にいくらかの電圧を誘起する。制御回路インピーダンスが非常に小さい場合には、これが無視できない影響を与える。第 10



第 10 図 磁心の残留インダクタンス

図のようなゲート時の磁化特性を仮定すると、

$$\left. \begin{aligned} \Phi_g \leq \Delta\Phi_r(n-1) \text{ の時 } N_c i_g &= N_c i_0 = 0 \\ \Phi_g > \Delta\Phi_r(n-1) \text{ の時 } N_c i_g &= \frac{\Phi_g - \Delta\Phi_r(n-1)}{\alpha} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

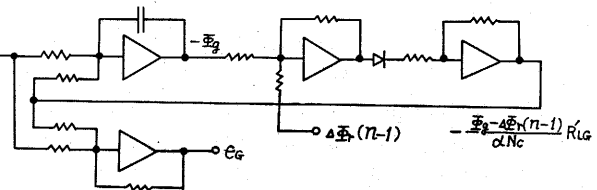
ただし、 i_g は制御回路側に換算したゲート電流で

$$\Phi_g = \frac{1}{N_g} \int_0^t e_g dt$$

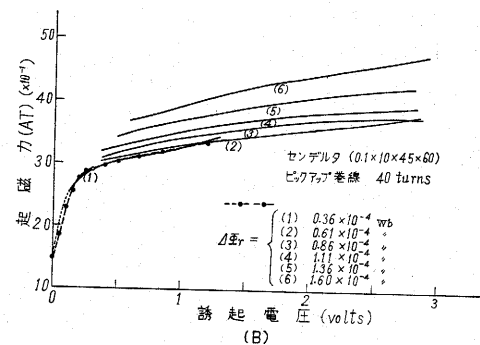
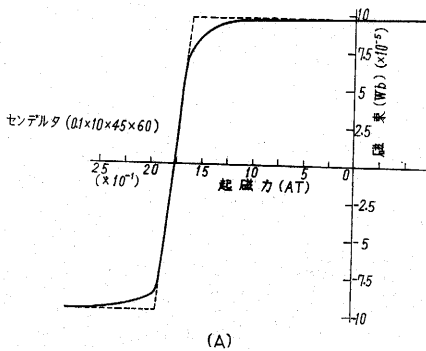
であり、ゲート時の磁束変化は、($e_f \approx 0$)

$$N_o \frac{d\Phi_g}{dt} = e_c = \frac{N_o}{N_g} e_a - i_g R_{Lg} \left(\frac{N_o}{N_g} \right)^2 \dots\dots (12)$$

で与えられる。(11)(12) から $e_c = N_o \dot{\Phi}_g$ を作り出す回路を第 11 図に示す。



第 11 図 残留インダクタンスがある時のゲート誘起電圧



第 12 図 磁化特性 (0.1 mm センデルタ)

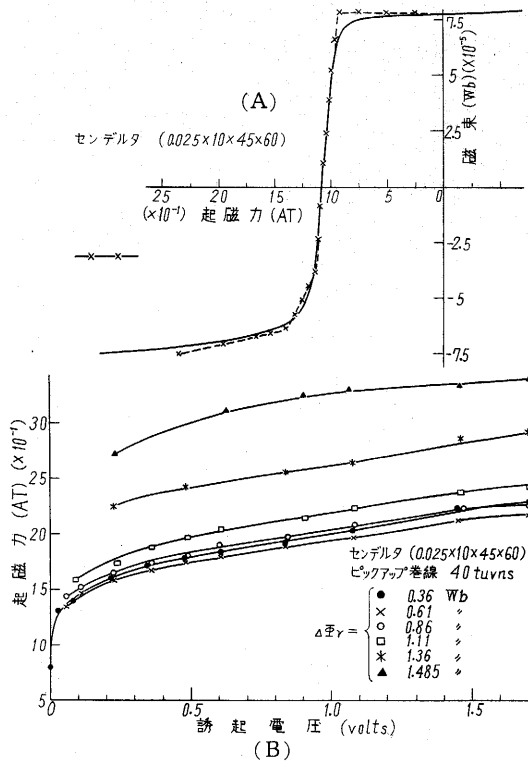
4. 実験結果

供試磁心として、もっとも広く使用されている 0.10 mm および 0.025 mm 厚のセンデルタ (50% Ni-Fe)

磁心を選んだ。

まず、基礎資料として 0.10 mm 厚の磁心については第 12 図 (A) (B)、0.025 mm 厚の磁心については第 13 図 (A) (B) の磁化特性を測定した。第 12 図 (A) の

研究速報



第 13 図 磁化特性 (0.025 mm センデルタ)

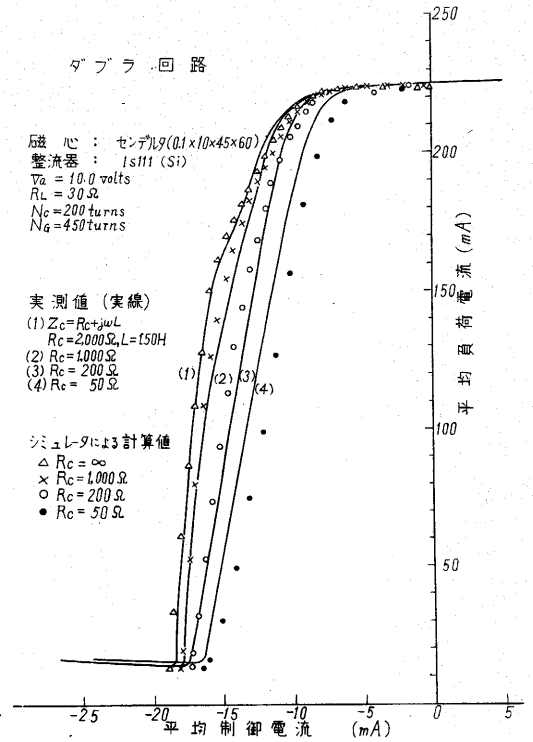
直流磁化特性を同図の破線のように近似すると、 $g(\Phi_r)$ を 1 個の抵抗とリミッタ (飽和を表わす) とでシミュレートすることができる。一方第 12 図 (B) の動磁化特性は、これを 2 本の折線で近似し 3. で述べた方法で非線形キャパシタンスを作った。同図の破線は、こうして構成したシミュレータの特性を実測したものである。

第 13 図 (A) の直流磁化特性は第 4 図 (C) の回路で近似できる。同図の破線は 4 本の折線と、リミッタで近似した場合の近似特性を実測した結果を示す。

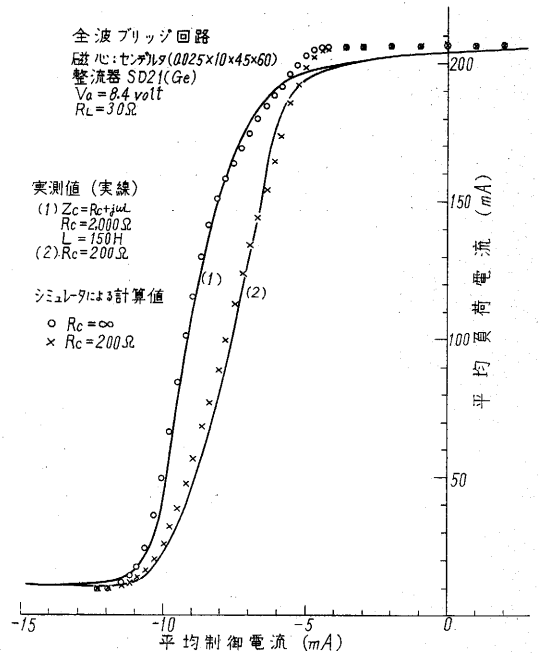
整流器と磁気増幅器の制御特性との関係を調べるため、SD21 (Ge), 1S111 (Si) の 2 種類の整流器を実験に使用した。それぞれの特性は前者が $e_f=0.074V$, $R_f=40\Omega$, 後者が $e_f=0.525V$, $R_f=53\Omega$ で、逆方向の特性については、磁心に与えられるアンペアターンに関する限り、ろうえい電流は無視できる。

第 14 図に 0.10 mm 厚の磁心を用いた磁気増幅器の定常制御特性についてのシミュレータによる計算値と実測値との比較を示した。 ($N_a=200t$, $N_g=450t$)。

0.025 mm 厚の磁心についての同様の結果を第 15 図、第 16 図に示した。シミュレータを動かしてみても経験したことは、磁心シミュレータの入力回路のダイオードの正方向抵抗がかなり演算精度を悪くしていることである。したがって、正方向特性のよいダイオードを用いる

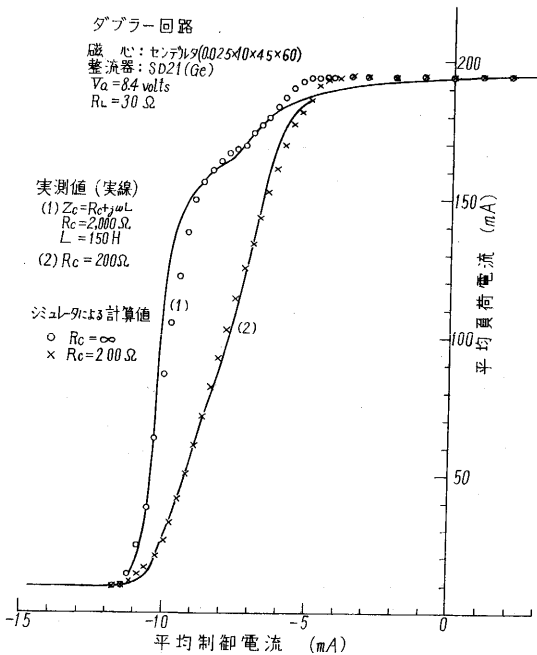


第 14 図 磁気増幅器の制御特性



第 15 図 磁気増幅器の制御特性

か、あるいは、磁心シミュレータの入力電圧、入力抵抗を大きく選ぶことによって改良することができる。回路型式や整流器による転流効果の程度のちがいがシミュレータによって予測されている。



6. 結 言

以上に説明したようにシミュレータは、アナログ演算

増幅器を基本要素として、適当なスイッチ制御を行ない、磁心、転流効果、ゲート機構等の磁気増幅器における重要な要素や現象をシミュレートすることにより磁気増幅器の定常および過渡制御特性を算定することができる。

市販の代表的な磁心 (0.10 mm および 0.025 mm 厚のセンデルタ磁心) について、回路型式、制御回路抵抗、整流器の種類を変えた場合の制御特性をシミュレータによって算定し、実測値と比較した。その結果、磁心その他の要素と設計パラメータ (電源電圧、巻数、負荷) が指定されれば、シミュレータにより磁気増幅器の制御特性を予測できることを確認した。

なお磁心における磁束逆転の物理的機構についても、理論的ならびに実験的解析を行なってきたがこれについては、別に報告する予定である。

(1961 年 12 月 26 日受理)

参 考 文 献

- (1) H.H. Woodson: AIEE Trans., **78**, pt. I (Jan. 1960)
- (2) Leliakov, Friedlander: Ibid., **80**, pt. I (March 1961)
- (3) D. Nitzan: Ibid., **78**, pt. I (Nov. 1959)
- (4) Kikuchi: Ibid., **76** pt.I (Mar 1957)
- (5) 宮本: アラロク技術研究会資料, 1: 6 (昭和 36—11)

筆 者 紹 介

◇ 渡 辺 勝 助 教 授 理 博	専攻 応用数学
◇ 渡 部 弘 之 助 手	専攻 同 上
◇ 丸 安 隆 教 授 工 博	専攻 測量学・土木構造学
◇ 小 林 一 輔 技 官	専攻 土木構造学
◇ 菊 池 真 一 教 授 工 博	専攻 光化学・電気化学
◇ 玉 木 章 夫 教 授 工 博	専攻 気体力学・熱学
◇ 三 石 智 技 官	専攻 同 上
◇ 永 井 達 成 技 官	専攻 同 上
◇ 宮 本 明 雄 大 学 院 学 生	専攻 電力機器学

IISNEWS

☆ 講 演 ☆

◇ 教授 森脇義雄「波高分析器の最近の進歩」第 3 回原子力研究総合発表会, 総合講演 4, 神田学士会館にて (1962. 2. 15)

☆ 寄 稿 ☆

- ◇ 助教授 山辺武郎「イオン交換樹脂膜」日本塩学会誌 **15** 137—145 (1961. 8)
- ◇ 助教授 山田嘉昭「ひずみ増分理論による半径方向絞りの解析」塑性と加工, Vol. 2, No. 10. 601—621 (1961. 11)
- ◇ 教授 (併任) 末岡清市「マスインストラクションについて」関東工業教育協会資料, 第 19 号 23 頁 (1961. 12)

- ◇ 助教授 河添邦太郎「吸着」化学機械装置年鑑 (1962) 第 4 編技術編, 111—115, 化学工業社 (1961. 12)
- ◇ 技官 桜井 裕「水中微量溶存鉄の連続電量滴定法」分析化学, **11**. 83—87 (1962. 1)

☆ 人 事 異 動 ☆

- ◇ 第 3 部 野村民也助教授は、教授に昇任した。(1962. 1. 1)
- ◇ 第 3 部 河村達雄技官は、助教授に昇任した。(1962. 1. 1)

☆ 学 位 取 得 ☆

- ◇ 第 2 部 高橋幸伯助教授は、工学博士の学位を取得した。(1961. 12. 22)
- ◇ 第 2 部 古川 浩研究員は、工学博士の学位を取得した。(1961. 12. 22)