

電磁浮揚の特性に関する基礎的研究(その2)

加熱力について

白石 裕* 斎藤 恒三*

On the Fundamental Study of the Characteristics of Electro-Magnetic Levitation
(II) On the Heating Efficiency. By Yutaka SHIRAISHI and Tunezō SAITŌ

To evaluate the characteristics of heating efficiency of electro-magnetic levitation, the experiments have been carried out by the use of small power oscillator (200 W) in the frequency range between 45 to 230 kHz. Copper and stainless steel spheres in which Pt/Pt-13% Rh thermocouple was embedded were used as specimens. Heating efficiency was evaluated by a tangent of temperature vs. time curve of the specimen at the initial stage of heating. Experiments covered three types of the coil, namely, cylindrical, conical with 2/10 tapered, and 4/10 tapered coil.

Experimental results are summarized as follows:

1) Relationships between heating efficiency vs. coil current indicate that the heating efficiency is proportional to the 2.3~3.0 power of the coil current for copper specimen and is proportional to the 2.0~2.2 power of the coil current for stainless steel specimen.

2) For stainless steel specimen, the heating efficiency is proportional to the 0.78 power of the frequency of coil current.

3) Above results do not agree with the theoretical predictions. The discrepancies presumably depend on the non-uniformity of the magnetic field through the coil and consequently depend on the local heating of the specimen.

4) Effect of the coil shape is not remarkable under the experimental conditions.

5) By assuming the average magnetic field in the coil, the theoretical calculations agree with the experimental results within the error of $\pm 50\%$.

(Received Sept. 30, 1971)

1. 緒 言

高周波電流を利用した浮揚溶解法はるつぽを使用しない溶解法として最近実験室的にしばしば用いられている。

しかし現在の浮揚溶解法には幾つかの欠点がある。すなわち使用者の立場から見て試料の溶解量が少ないこと、加熱の制御が困難であり、とくに比較的低温での浮揚溶解が難しいこと、電流効率が低いことなどが挙げられる。前二者とくに試料の加熱力については浮揚溶解コイルの形状を工夫したり、冷却ガスを用いるなどの試みが種々なされているが、その多くは試行錯誤による経験に依存している状態にあるといえよう。我々は前報¹⁾において小出力の電源を用いたモデルの実験により試料に働く浮揚力とコイル内磁場の強さ、コイル電流、電源周波数間の関係を求め理論式からの偏倚がかなり大きいことを指摘したが、本報においては試料の加熱力について前報と同様なモデルの実験の結果を報告する。

2. 実 験

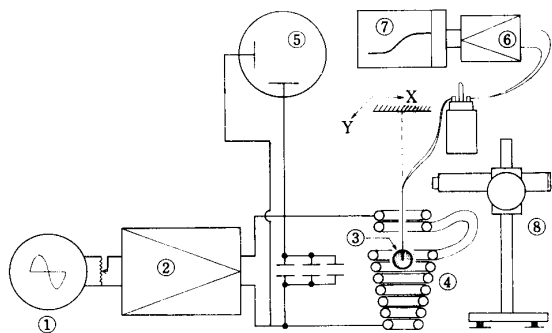
使用した実験装置を第1図に模式的に示す。電気回路①~⑤は前報と同様であり発振器①および増巾器②によって生じた正弦波電力をCL共振回路に供給し、浮揚溶解コイル④内に試料を懸垂する。コイルに流れる電流は共振回路の端子電圧をシンクロスコープ⑤によって測定しコイルのL値

選鉱製錬研究所報告 第582号 金属学会昭和45年秋季大会(尼崎)発表

* 東北大学選鉱製錬研究所

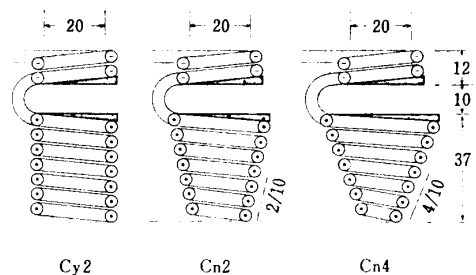
1) 白石 裕, 斎藤恒三: 選研彙, 26(1970), 115.

と電源周波数から求めた。実験に使用したコイルの形状は前報と同様の3種類で第2図に示されるものである。また試料は銅(以下 Cu と記す)とステンレス鋼(以下 S. S. と記す)の 10 mmφ の球で、中心まで、0.5mmφ の孔を穿ち 0.2mmφ の Pt/Pt·13% Rh 熱電対を挿入して樹脂で固め、封入した熱電対でコイル内に懸垂し、その位置は読取望遠鏡⑧で決定した。熱電対は冷接点、直流増巾器⑥を経て記録計⑦に接続され試料の加熱に伴う起電力が時間に対して描かれる。熱電対は封入されている試料ごと増巾器、記録計を含めて 0~100°C 間精密棒状水銀温度計で予め校正されている。



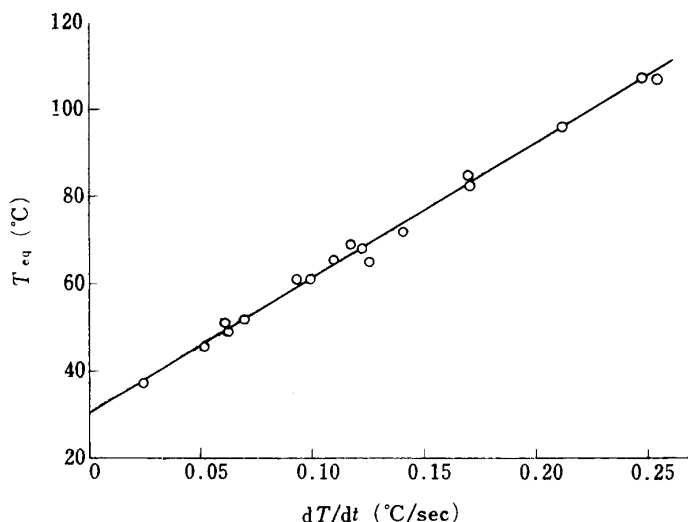
第1図 加熱実験装置

- ① 発振器 ② 増巾器 ③ 試料
- ④ 浮揚溶解コイル ⑤ シンクロスコープ
- ⑥ 前置増巾器 ⑦ 記録計 ⑧ 読取望遠鏡



第2図 コイル形状 (単位 mm)

加熱力を見積るためには一定入力を加えて到達温度を測定する方法が第一に考えられる。しかし到達温度を求めるためには測定に長時間を要し、また試料の加熱に伴い試料の電気抵抗、比熱などが変化するために到達温度によって加熱力を評価することは必ずしも当を得ているとはいえない。一方試料の加熱初期を考えると試料は室温と平衡しており試料よりの熱損失は無視できるので理想的には加熱初期における温度上昇速度が加熱入力による発熱量と直接的相関を示すものと考えることができよう。そこで予備実験として加熱初期の試料温度上昇速度と到達温度の相関を求めてみた。



第3図 加熱速度と到達温度の関係

その結果第3図のようにほぼ直線の関係が得られた。そこで以下加熱初期の温度上昇速度より試料の熱容量を用いて単位時間当りの発熱量 cal/sec を求め、これをもって加熱力のパラメータとすることにした。

実験操作は次のような手続きで行った。コイル内所定位置に試料を懸垂し、記録計を働作して2~3min 放置し熱起電力に変動の生じないことを確かめてからコイルに所定電流を流す。試料は加熱されて記録紙上に昇温曲線を描く。

3~5min の加熱後コイル電流を切り

り試料に冷却空気を吹きつけて試料温度を室温に引き戻す。この操作を第1表の計画表に従い各試料、各コイルについて所定位置で電流値を3~5水準にとりて行い、次に電源周波数を変化させて逐次測定した。

第1表 実験計画

試料	コイル	位置	周波数 (kHz)	電流
Cu	Cy	-10mm	45, 60, 90, 120, 160, 230	4~10A, 3~5水準
	Cn2	-10*	45, 60, 90, 120, 160, 230	"
	Cn4	-10	45, 60, 90, 120, 160, 230	"
S. S.	Cy	-10	45, 60, 90, 120, 160, 230	2~10A, 3~5水準
	Cn2	-10*	45, 60, 90, 120, 160, 230	"
	Cn4	-10	45, 60, 90, 120, 160, 230	"

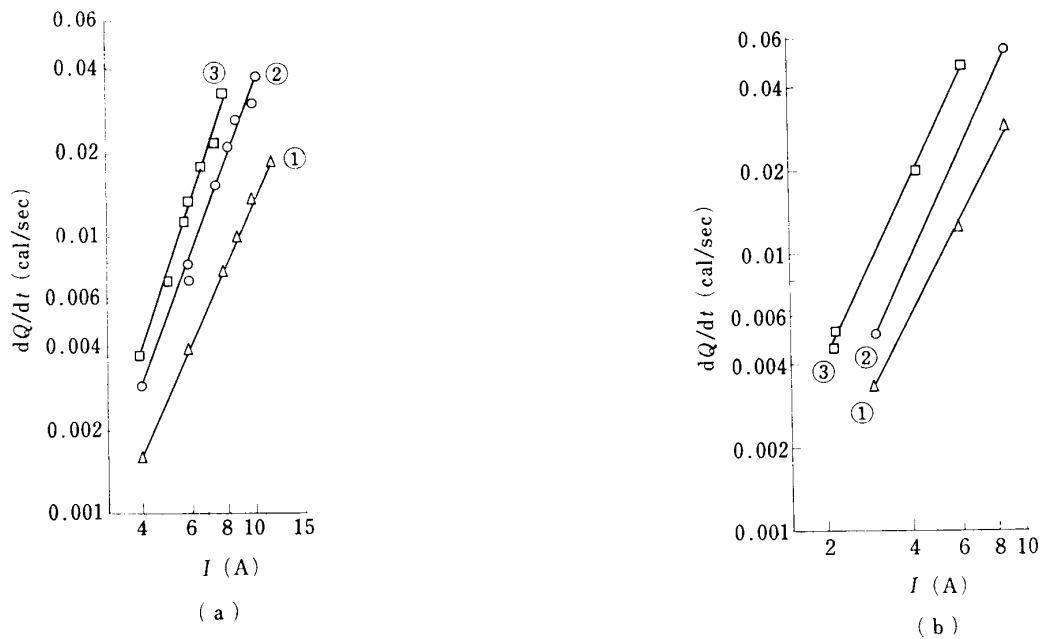
*) f=90 で +10, 0, -10, -20, -30, -40 と位置を変える

3. 実験結果と考察

浮揚溶解コイル内の磁束分布は一様でないから試料がコイル内のどの位置に存在するかということとは実験結果にとって重要な因子である。そこで正、逆捲きの中間点を位置の原点とし、逆捲きコイル方向を正、正捲き方向を負にとって mm 単位で実験結果を表示する。

コイル内 -10mm の位置における加熱力とコイル電流の関係を第4図に例示する。Cu 試料についてはコイルによる差が大きいと明らかに電流値の2乗よりは大きいべき乗に比例する結果が得られ、一方 S. S. 試料ではほぼ電流値の2乗に比例する結果を得た。いずれも電源周波数が高くなるにつれてべき乗数が増す傾向を示している。また同一電流値では S. S. の発熱量が Cu に比して2~3倍程度大きい。コイルに流しうる電流値は電源の容量、並列コンデンサーの電流容量などにより制限を受け、とくに高い周波数では電流をあまり大きくすることは出来ない。そのため発熱量の少ない Cu 試料の測定は S. S. 試料に比して誤差が大きく確度が少ない。そこで以下主として S. S. 試料についての結果をとりあげることにする。

S. S. 試料について電源周波数と発熱量の関係を第5図に例示する。同図はコイル電流 6A における各コイルの加熱力を示したものでいずれのコイルにおいても加熱力は電源周波数のほぼ0.78乗



第4図 加熱力とコイル電流の関係 (Cn2)

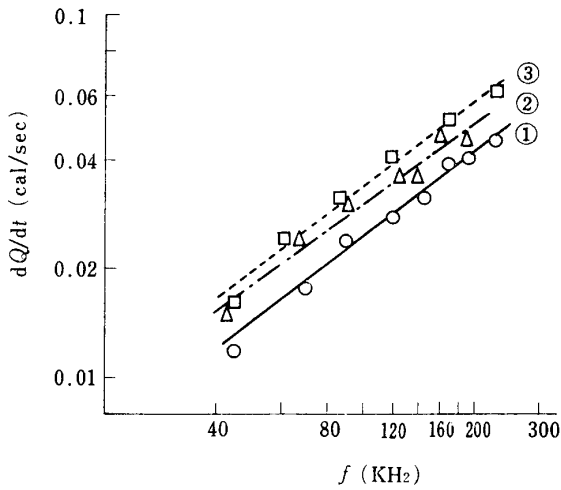
(a) 試料 Cu10φ

- ① $f=44.5\text{kHz}, \propto I^{2.3}$
- ② $f=90\text{kHz}, \propto I^{2.7}$
- ③ $f=160\text{kHz}, \propto I^{3.0}$

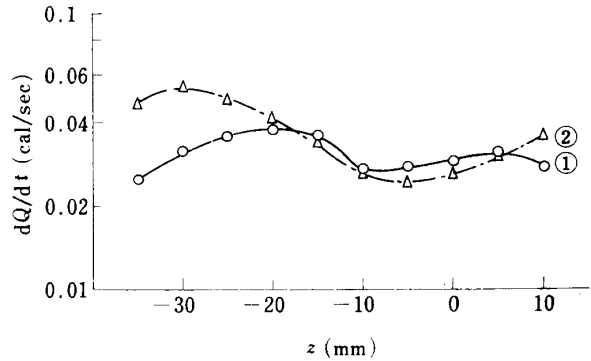
(b) 試料 S. S. 10φ

- ① $f=45\text{kHz}, \propto I^{2.0}$
- ② $f=86.5\text{kHz}, \propto I^{2.2}$
- ③ $f=168\text{kHz}, \propto I^{2.1}$

に従って増加している. なおこのべき指数はコイル電流値により多少異なってくる.



第5図 電源周波数と加熱力の関係
コイル電流6A, 試料S. S. 10φ 試料位置-10mm
①Cy2, ②Cn2, ③Cn4



第6図 コイル内位置と加熱力の関係
コイル電流 6A, 試料S. S. 10φ
①Cy2, f=87.5kHz ②Cn2, f=90kHz

第6図はコイル電流 6A, 電源周波数 80~90kHz としたときのコイル内位置による加熱力の変化を示す. 加熱力が極小となる位置は正捲きコイル内に試料がやや入ったところであり, 正一逆捲きの中間に試料のあるときよりも僅かではあるが異なっていることが注目される. 以下に第4, 5, 6図について主として Cn2 コイルを例にとり従来知られている理論²⁾との比較を行ないながら考察してみる.

半径 a cm の球状試料が強さ H [A/cm] の均一な磁場におかれたときに吸収する電力 P [W] は

$$P = 3\pi a \rho H^2 F(x) \dots\dots\dots (1)$$

ここで ρ は試料の電気抵抗 [$\Omega \cdot \text{cm}$], $F(x)$ は補正係数で(2)式で示される.

$$F(x) = \frac{x(\sinh 2x + \sin 2x) - (\cosh 2x - \cos 2x)}{\cosh 2x - \cos 2x} \dots\dots (2)$$

$$x = a/\delta, \delta = 1/(\pi f \mu / \rho)^{1/2}$$

ここで δ は電流深度 (skin depth) [cm], μ は透磁率 [$\text{V} \cdot \text{s} / \text{A} \cdot \text{m}$], f は電源周波数 [Hz] である.

(2)式は $x > 2$ のときは十分な精度で

$$F(x) = x - 1$$

と近似でき, したがって(1)式は次の(3)式のように書くことができる.

$$P = 3 \sqrt{\pi^3 \mu} \sqrt{f} \sqrt{\rho} a^2 H^2 \left(1 - \frac{\sqrt{\rho}}{a \sqrt{\pi f \mu}} \right) \dots\dots\dots (3)$$

なお f が充分大きいとき(3)式の第2項は省略できる.

本実験条件下では均一な磁場でないので (均一な磁場では浮揚力が生じない) (3)式をそのまま適用することはできないが平均的磁場を仮想的に考えることにより一応の目安を得ることができると考えても良さそうである.

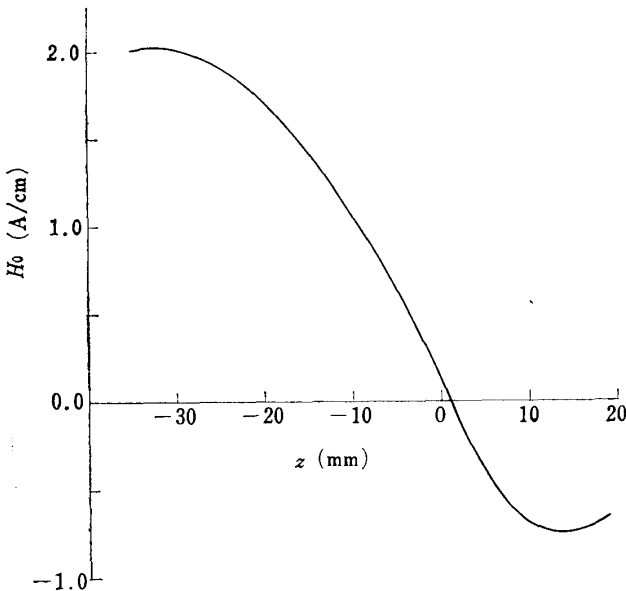
Cu, S. S. の電気抵抗をそれぞれ $1.7 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$, $70 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ とすると, 50kHz において(3)式の補正項は Cu では 0.006, S. S. では 0.038 となり本実験条件下では補正を無視しても差支えないので以下補正項を除いた(4)式を用いることにする.

2) E. Fromm & H. Jehn: Z. Metallk. 56(1965), 599.

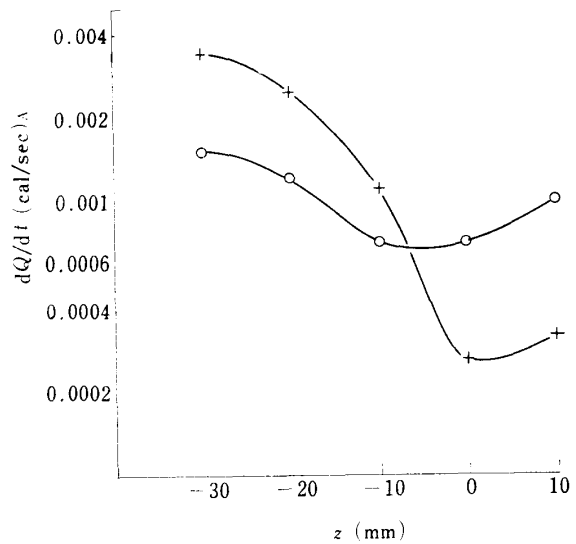
$$P = 3\sqrt{\pi^3\mu} \sqrt{f} \sqrt{\rho} a^2 H^2 \dots \dots \dots (4)$$

(4)式によると P は H^2 つまりコイル電流 I の2乗に比例することになるが実測値は第4図に示したように Cu 試料では 2.3~3.0 乗, S. S. 試料では 2.0~2.2 乗に比例し Cu 試料では明らかに(4)式と喰い違っている。また Cu と S. S. の差も(4)式における $\sqrt{\rho}$ の差ほど大きくはない。これらの喰い違いの原因が何に由来するものであるか明瞭でないが, Cu と S. S. の熱伝導率の差が不均一磁場の局所加熱とあいまって Cu の場合 S. S. に比して見掛け上 H を大きくする効果を示していることが考えられる。第6図の周波数依存性は P が $f^{0.78}$ に比例を示しており(4)式の表現とは異なっている。この現象も恐らく試料の局所加熱が周波数と共に増大する表皮効果に重畳したために起るものと考えられ, 本質的に不均一磁場を用いる浮揚溶解法においては避けられぬ問題であるように思われる。したがって(1)または(4)式を適用しようとするとき H のとり方に十分な注意が必要であり, 局所加熱効果を含めた実効磁場を考える必要がある。第6図のコイル内位置による変化を(4)式と比較するために前報で測定したコイル内磁場の強さを Cn2 コイルにつき第7図に示す。第7図をもとにして(4)式によりコイル内の位置による加熱入力の変化を求めると第8図のようになる。同図には比較のため第6図の結果を I^2 に比例するとして単位電流当りの加熱力に換算した結果を併記した。また第7図より磁場の強さを求める際, 試料球の大きさに対応する軸方向の長さを取りその間の磁場の強さを2乗平均した値をもって(4)式の H とした。第8図にみられるように実測と計算結果の一致は余り良くないが, 全体の傾向はある程度類似しており, かつオーダー的に一致する。前述のように平均磁場のとり方に本質的な誤差を含むことを考えると, この程度の一致を示すことで満足しなければならないように思われる。以上記述したように(1)式または(4)式の適用は浮揚溶解コイルを対象とした場合は必ずしも十分な結果を与えるものではないが, オーダー的な目安を得ようとする場合には拠り処となるものと思われる。

前報において報告したように本実験条件下では試料に働く浮揚力 F_z を半定量的に次の(5)式で表わすことができる。



第7図 コイル内磁束分布 (Cn2, 軸中心)

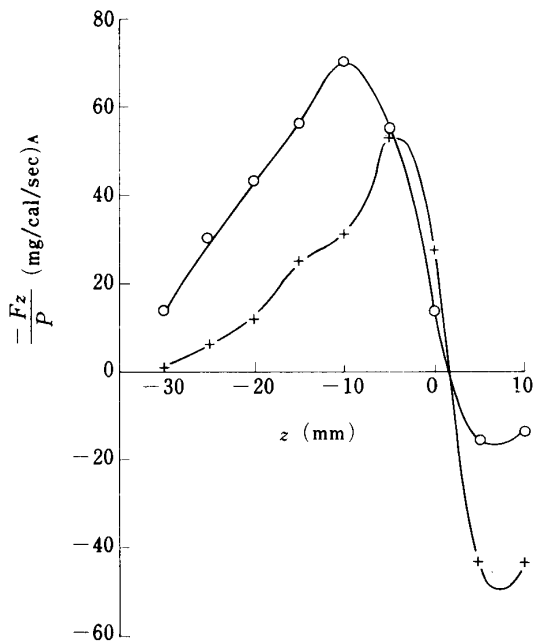


第8図 コイル内位置による加熱力の変化
実測値と計算値の比較
(コイル電流1A, 試料S. S. 10φ)
○ 実測値, + 計算値

$$-F_z = \frac{1}{2} \pi \mu a^2 H (dH/dz) \dots \dots \dots (5)$$

一方加熱力は(4)式でオーダー的に近似できるので浮揚力と加熱力の比をとると

$$\frac{-F_z}{P} \doteq \text{const} \frac{dH/dz}{H} \dots\dots\dots (6)$$



第9図 コイル内位置による浮揚力と加熱力の比の変化 (Cn2, 試料 S.S.10φ, コイル電流1A)
 ○ 実測値. + 計算値

となり, したがって浮揚力を大きくし加熱力を小さくするためには磁場の勾配を大きくし, かつ磁場そのものは弱いような条件を満たす浮揚溶解コイルを作ればよいことになる. 前報で浮揚力を計算した際単捲きコイルの積層と考えて定性的に示したが, 加熱力の場合は不均一な磁場による局所加熱効果が大きく利き単純な計算によって(6)式の評価を行なうことはできない. しかし平均磁場を用いると第8図程度の傾向的一致は得られるので, その結果と前報での浮揚力の計算結果をもとにして, 浮揚力と加熱力の比を求め, 位置に対して図示すると第9図のごとくコイルの中間的附近では比較的良い一致を示す. 試料の大きさが充分小さくなると計算との一致はさらに良好になるものと考えられるが, 現実の問題としては理論式とこの程度の差が生ずることを考慮に入れておく必要がある. なお他のコイルについての $-F_z/P$ の計算結果は第9図とほぼ類似な結果を与え第2図に示した程度のコイル形状の差は浮揚溶解特性に著しい影響を与えないように思われる.

4. 結 言

本実験により得られた結果を総括すると次のようになる.

1. 加熱力とコイル電流 I の関係は見掛け上 Cu 試料では $I^{2.3\sim 3.0}$, S.S. 試料では $I^{2.0\sim 2.2}$ に比例する.
2. 加熱力の電源周波数 f との関係は S.S. 試料の場合 $f^{0.78}$ に比例する.
3. 以上の結果は加熱入力 P が I^2 および \sqrt{f} に比例するという理論式と明瞭に差を生ずるが, このくい違いは恐らく試料の局所的加熱によるものであると考えられる.
4. 理論式の適用は定性的一致を示すが定量的にはオーダー的に一致する程度である. 従って理論式により設計を行なうときには50%程度の誤差を見込む必要がある.

本研究の遂行にあたり研究費の一部を文部省試験研究費によった. ここに深謝の意を表します.